084

昭和49年度サンシャイン計画委託研究開発成果報告書

水素の精製・輸送・貯蔵システム及び保安技術に関する研究

昭和50年5月31日

財団法人 工業開発研究所

NEDO 図書・資料室
010018242-7

目　　次

	頁
はじめに	1
委員名簿	4
§1　序　論	7
§2　水素の精製・貯蔵・輸送システムの主要構成要素	8
2－1　概　要	8
2－2　水素エネルギーシステムの空間的パターンの想定	8
2－3　水素の精製・貯蔵・輸送システム要素の総括的洗い出し	15
§3　精　製	21
3－1　概　要	21
3－2　精製各論	21
3－2－1　吸収法	21
3－2－2　吸着法	30
3－2－3　深冷分離法	33
3－2－4　拡散法	37
3－3　気体水素利用のための精製	41
3－3－1　各種化学工業の副生ガスを原料とする方法	41
3－3－2　石油，石炭，天然ガスを原料とする方法	42
3－3－3　水の電解法	43
3－4　水素液化のための精製	44
3－5　現状技術と将来	44
§4　貯　蔵	45
4－1　概　要	45
4－2　気体水素の貯蔵	45
4－3　液体水素の貯蔵	49
4－4　金属水素化物の貯蔵	59
4－4－1　概　要	59
4－4－2　製　造	64
4－4－3　貯　蔵	67

§ 5　輸送分配　75
5－1　概　要　75
5－2　気体水素　75
5－2－1　水素ガスパイプラインの現状　75
5－2－2　都市ガス（メタン系）配管の現状（日本）　77
5－2－3　天然ガスパイプライン　78
5－2－4　水素配管網計画　78
5－3　液体水素　84
5－3－1　パイプ輸送　84
5－3－2　バッチ輸送　84
5－3－3　液体水素輸送に関する経費の問題　89
5－4　安全問題　90
5－4－1　気体水素配管　90
5－4－2　液体水素の問題　91
5－4－3　金属水素化物　93
5－4－4　地下導管としての問題　93
5－4－5　水素のリークに伴う問題　94
5－5　現状技術と将来　97
5－5－1　スケールアップ　97
5－5－2　コントロールシステム　98
§ 6　安全設計と安全管理　99
6－1　材料の選択と強度　99
6－2　水素の特性　102
6－2－1　安全に関する特性　102
6－2－2　その他の特性　110
6－3　水素漏洩．酸素混入管理　114
6－4　安全指針　115
6－4－1　全　般　115
6－4－2　精製関係　116

6－4－3　貯蔵・輸送関係　117
6－4－4　金属水素化物　117
6－4－5　危険予防対策の基本　118
6－5　安全工学協会等における成果の概要　118
6－5－1　内外における資料の収集　118
6－5－2　水素の液化過程における微量不純物の挙動　120
6－5－3　水素の低温貯蔵，精製段階の安全のための計測制御システム　121
6－5－4　水素の流通消費プロセスにおける保安技術　124
§7　水素の精製・貯蔵・輸送システム　128
7－1　考え方　128
7－2　水素の精製・貯蔵・輸送システムの基本構成　129
7－2－1　水素ガス系　129
7－2－2　液体水素系　130
7－2－3　金属水素化物系　131
7－3　水素の製造から利用までにおける精製・貯蔵・輸送システムの位置づけ　133
7－3－1　エネルギー基地と中間基地　133
7－3－2　分配センターと最終利用　134
7－4　システム構成上の一般的な検討項目　136
7－4－1　エネルギー基地，中間基地における水素－電力の製造変換，貯蔵システム　136
7－4－2　エネルギー基地間及び分配センターへの輸送システム　136
7－4－3　分配センターにおける水素－電力の貯蔵，変換システム　137
7－4－4　末端分配システム　137
7－5　システム代替案の構成と個々の検討項目　137
7－5－1　システム代替案の基本形　137
7－5－2　代替案構成上の不確定要素　139
7－5－3　水素の精製・貯蔵・輸送システムとしての具体的な代替案と個々の技術的検討項目　140

7－6　システム代替案の評価に関する検討　142
7－6－1　利用形態上での評価例　142
7－6－2　構成要素の規模の現状と将来　147
7－6－3　定量的評価に必要な機器仕様を決定する手続　152
7－6－4　定量的評価に必要な機器の技術的検討項目　155
7－6－5　現在のエネルギーにおける環境安全性　159
7－6－6　水素の精製・貯蔵・輸送システムにおける環境安全性　159
7－6－7　環境安全性の評価手法の考え方　162
7－7　参考モデル例　165
7－7－1　実験的な水素の精製・貯蔵・輸送　165
7－7－2　空港モデルの一例　167
7－7－3　自動車用スタンド・モデルの一例　168
7－7－4　100万人都市用水素ガスの供給導管網設計例　173
7－8　水の分解からの副生酸素について　197
§8　研究開発の重点項目　199
8－1　システム・ソフト・ウエア　199
8－1－1　必要な技術　199
8－1－2　研究開発における問題点　199
8－1－3　研究開発のアプローチの方法　201
8－2　水素の精製・貯蔵・輸送システムにおける主要構成機器の開発　207
8－2－1　開発の意義　207
8－2－2　開発の手順　208
8－2－3　機器開発における優先度　209
8－3　金属水素化物　211
8－3－1　要求される金属水素化物の性能　211
8－3－2　金属水素化物自体に関する研究開発の方向　211
8－3－3　エンジニアリングの問題　212
8－3－4　金属水素化物選定のための手順　212

8－4　材料・構造・熱流体等の基礎　214
8－4－1　材料強度　214
8－4－2　構造強度　214
8－4－3　熱流体　215
おわりに　217
引用文献　220

はじめに

本研究は，サンシャイン計画における水素エネルギー技術のうち，水素の保安対策技術の研究の一環として，通産省工業技術院からの委託をうけて行なったものであり．その目標は，

(1)水素流通体系のシステム代替案について，可能性，社会への適合性，経済性，信頼性，動特性等の観点から総合評価し，最も合理的なシステムを撰択するとともに．そのシステム実現のための問題点の摘出を行なうこと，(2)水素エネルギーシステムに関する保安技術基準案を作成するとともに，その裏付けとなる具体的な防災技術に関する基礎的な知見を得ること．にある。

昭和49年度はこのうち，

(1) 水素流通体系のシステム解析

(a) システム代替案のシステム解析

(b) 各システム実現のための問題点の摘出

(2) 水素エネルギーシステムにおける保安技術に関する調査研究

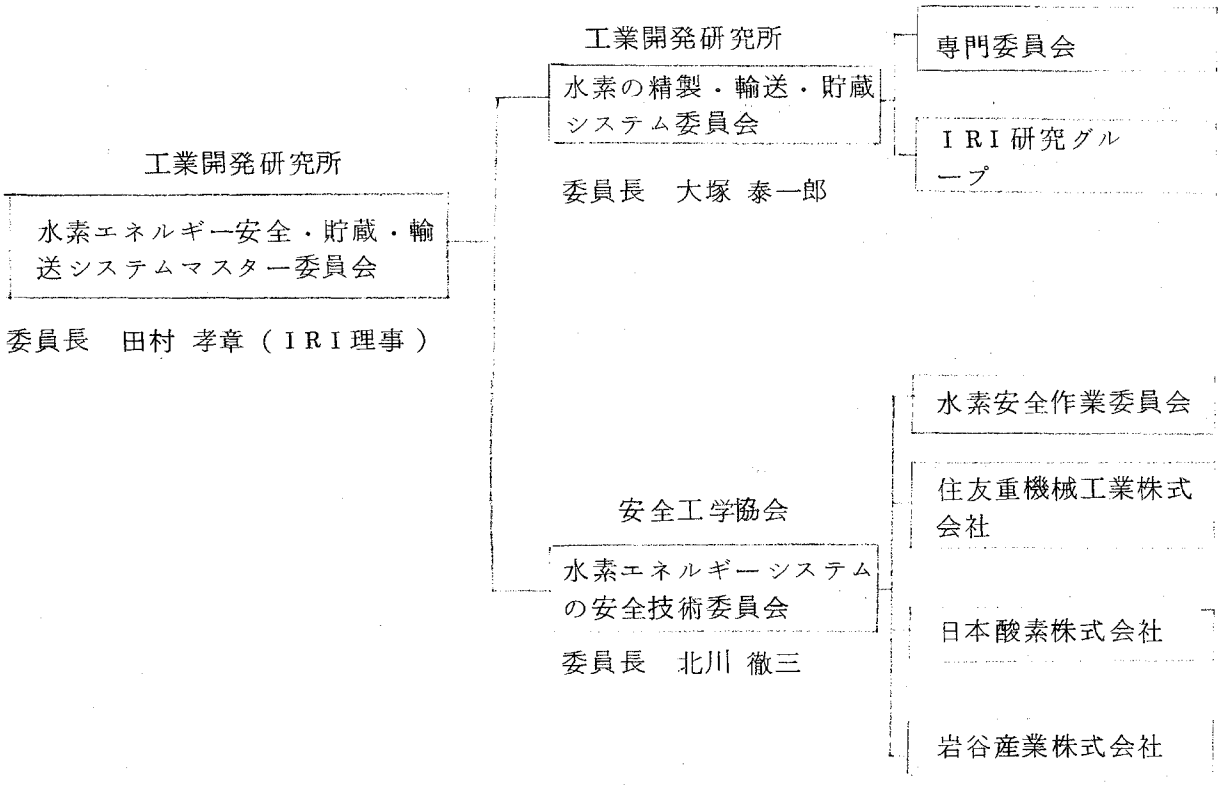
(a) 水素に関する現行法規及び取扱基準ならびに災害事故例についての内外における調査収集

(b) 予想される具体的な保安問題に対する調査研究

(3) 安全のために必要な関連技術（不純物の影響，計測技術，漏洩事故防止技術等の調査）

を行なった。

研究体制は，再委託先4社をふくめて次の通りであり，マスター委員会のもとに各委員会，専門委員会が設置され，別掲の委員，研究者等により精力的に研究が進められた。



本報告書は，その研究の詳細な成果をまとめたものである。なお，本年度は，当研究所は主として水素流通体系のシステム解析を担当したが，将来の目標は，これにとどまらず，委託研究成果を総合活用して，水素の安全流通体系のための実用安全設計コードを開発するところにある。

このような発展を目標として，本研究の成果を次年度には，

(1)　水素流通体系のシステム解析

(a)　システム実現のための技術的問題点の詳細なほり下げとその具体的な解決策の検討

(b)　システムの主要構成要素ならびにシステム代替案についての技術的評価の試み

(2)　水素エネルギーシステムにおける保安技術に関する調査研究

(a)　内外における調査，収集の継続

(b)　調査，収集資料の解析のまとめ

(3)　安全のために必要な関連研究（実験をともなう基礎研究）

につなげるべく計画中である。

更に，本年度は，水素の精製・貯蔵・輸送のシステムとしての位置ずけを行なう必要にせまられたため，巾の広い範囲にわたって研究を行なったが，次年度以降は，より技術的な視野で深みのある方向にすすみたいと考えている。

なお，再委託先4社における成果の概要は本報告書にもまとめられているが，（§6－5参照），その詳細はそれぞれ別冊を参照されたい。

又，本研究の実施にあたって調査収集したデータのうち，本研究に間接的に関連する主なデータを，図表にしぼって別冊資料編とした。本報告書と同様に御参照下されば幸甚である。

本報告書をとりまとめるにあたり，サンシャイン計画推進本部の御関係者，委員のかたがた，研究に御参加願った各位に深く謝意を表わすとともに，今后の一層の御鞭撻を願う次第である。

財団法人　工業開発研究所

理事長　小林宏治

委　員　名　簿

(a)　水素エネルギー安全・貯蔵輸送システムマスター委員会

氏　名	所　属
田村孝章委員長	工業開発研究所理事，東京大学工学部教授
大　塚　泰一郎	当研究所嘱託，東北大学理学部教授
秋　山　　守	当研究所嘱託，東京大学工学部教授
北　川　徹　三	横浜国立大学名誉教授，安全工学協会副会長
松　野　武　雄	横浜国立大学環境科学研究センター教授，安全工学協会理事
小　寺　嘉　秀	工業技術院東京工業試験所第6部長
橋　口　幸　雄	工業技術院東京工業試験所第6部主任研究員
若　松　清　司	電子技術総合研究所システムダイナミックス研究室長
加　藤　昭　六	工業技術院サンシャイン計画推進本部研究開発官
若　沢　　敏	（社）日本瓦斯協会常務理事，技術部長（当初は椿原健督）
岡　田　啓次郎	安全工学協会

(b)　水素の精製・輸送・貯蔵システム委員会

氏　名	所　属
大　塚　泰一郎	当研究所嘱託　東北大理学部教授〔専門委員長〕
田　村　孝　章	当研究所理事，東京大学工学部教授
信　貴　豊一郎	大阪市立大学理学部教授〔専門委員〕
秋　山　　守	当研究所嘱託,東京大学工学部教授〔専門委員〕
斉　藤　孝　基	当研究所嘱託，東京大学工学部助教授〔専門委員〕
石　崎　嘉　宏	当研究所嘱託，東京大学工学部助手〔専門委員〕
小　寺　嘉　秀	工業技術院東京工業試験所第6部長
若　松　清　司	電子技術総合研究所システムダイナミックス研究室長
加　藤　昭　六	工業技術院サンシャイン計画推進本部研究開発官
若　沢　　敏	(社) 日本瓦斯協会常務理事，技術部長（当初は椿原健督）
蘭　谷　英治郎	東京ガス㈱供給技術室次長
柵　山　俊　樹	大阪ガス㈱社長室専門部長
千　葉　良　昭	東京ガス㈱工務部燃料電池グループ
篠　部　健　治	富士電機製造㈱技術企画部次長
中　島　耕　一	（株）豊田中央研究所第6研究室所員
近　藤　　正	アイシン精機㈱商品開発事業部開発第二部長
吉　田　研　治	三井東圧化学総合研究所主任研究員
岩　城　隆　行	日本揮発油㈱企画開発本部第二部長
小　松　昭　英	千代田化工建設㈱プロセス技術部長（当初は岸本健夫）
草　刈　和　彦	石川島播磨重工業㈱技術研究所流熱部次長
北　川　徹　三	横浜国大名誉教授，安全工学協会副会長
松　野　武　雄	横浜国立大学環境科学研究センター教授，安全工学協会理事

(c) 水素エネルギーシステムの安全技術委員会

氏　　名	所　　属
北川徹三委員長	横浜国立大学名誉教授
松野武雄	横浜国立大学環境科学研究センター教授
秋田一雄	東京大学工学部教授
小倉信和	横浜国立大学工学部教授
加藤昭六	工業技術院サンシャイン計画推進本部研究開発官
橋口幸雄	工業技術院東京工業試験所第7部第2課長，安全工学協会理事
水島容二郎	工業技術院東京工業試験所第7部第1課長
柳生昭三	労働省産業安全研究所主任研究官
鎌田吉郎	通産省立地公害局保安課長
野原石松	労働省労働基準局安全課長
永瀬　章	自治省消防庁予防課長
石井尚道	高圧ガス保安協会理事
若沢　敏	日本瓦斯協会常務理事，技術部長
田村孝章	(財)工業開発研究所理事
宗像幹夫	(財)工業開発研究所主任研究員
楫野英男	岩谷産業㈱安全保安部長
菊池一成	住友重機械工業㈱平塚研究所技師
安藤道弘	日本酸素㈱技術本部開発センター所長

(d) 水素安全作業委員会

氏　　名	所　　属
橋口幸雄委員長	工業技術院東京工業試験所第7部第2課長
安藤道弘	日本酸素㈱技術本部開発センター所長
上原陽一	横浜国立大学工学部助教授
浦野陽吉	工業技術院東京工業試験所第7部研究員
小倉信和	横浜国立大学工学部教授
楫野英男	岩谷産業㈱安全保安部長
菊池一成	住友重機械工業㈱平塚研究所技師
塩田莞爾	工業技術院公害資源研究所資源第4部研究員
花田卓爾	帝国酸素㈱プラント販売部長
前沢正礼	大阪瓦斯㈱理事
柳生昭三	労働省産業安全研究所主任研究官
山口　裕	昭和大学医学部助教授

(e) 当研究所の主要研究者名簿

氏　　名	所属・役職
田村孝章	当研究所理事研究本部本部長（東京大学工学部教授）
三橋寛登	当研究所常務理事企画本部長
宗像幹夫	当研究所主任研究員（低温工学協会兼務）
根岸直毅	当研究所企画本部部長
千野哲夫	当研究所研究員

他5名

§1　序　論

水素が資源的，環境的にみても，また種々の形態での効率的な輸送，貯蔵の可能性，広い利用面等の見地からも，2次エネルギーの媒体としてすぐれた特性をもっていることから，近年水素を主媒体とした種々のエネルギー・システムが論じられている。新エネルギー開発の一環として，何故に水素エネルギーをとり上げるかはもはや論をまたないところであろう。

問題は今後水素エネルギーの利用を開発するに当って，何を，如何にして研究開発するかという点にあるといえる。このためには，単にシステム的な面ばかりでなく，システムを構成する諸要素の技術的問題的を早い時期に洗い出しておく必要があろう。問題へのアプローチは種々考えられるが，先立つものとして現状技術の的確な把握と評価が肝要である。

いうまでもなく，現状技術を評価し，問題点を洗い出する当っては，ある程度システムの規模と型態を想定する必要がある。システム構成要素はあくまでシステムの中の要素であって，それらに対する技術評価も技術開発課題もシステムと全く独立には論じえない。しかしながら，このようなハード面とソフト面の密接なからみ合いからくる複雑性は初段階では極力避けるべきであろう。

当委員会は水素エネルギー・システムの中でも重要なサブ・システムである精製，輸送，貯蔵とそれらに関連した安全性を研究することを目標にはじめられた。このため，初めのステップとして，上記にのべた線にそって，モデル都市を想定した極力単純なシステムを設定し，個々の項目の検討を進めた。ソフトとハードのからみ合いはかりでなく，ハードの中でも相互に関連をもった諸形態があるが，これも初段階では並列的に検討し，比較検討は今後の課題とした。一例としての貯蔵の形態として水素ガス，液体水素，金属水素化物の技術的検討が先ず並列的に行なわれた。

以上の如く，本年度の研究の先端は，ある結論で閉じずに開放的で，次年度以降の研究に整合しうるようになっている。

§2　水素の精製，貯蔵，輸送システムの主要構成要素

2－1　概　要

水素をエネルギーシステムの中に導入する時間的経過として，短期，中期，長期の各観点から検討を行なうことが必要であり，それぞれの時期に応じて水素需要量や利用形態も異ってくると考えられる。水素の導入を漸増的なものとみれば，短期的にはまず，工業用エネルギー需要の部分的代替と民生用一部代替の併用，長期的には全面的な水素－電力システムへの移行，もしくは合成化学燃料との併用となることが想像される。

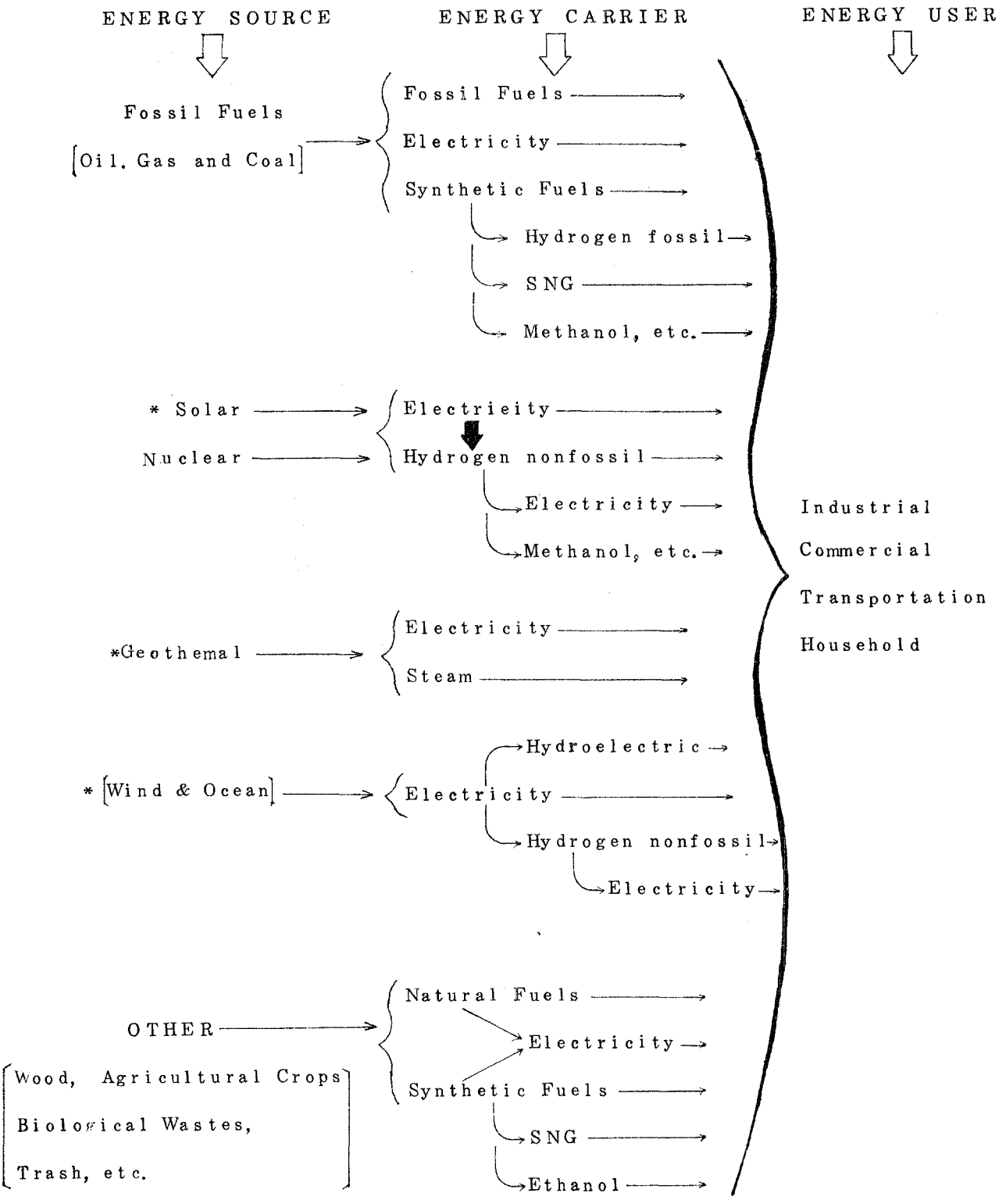
水素と現在エネルギーシステムとの接続を時間的考慮の下に十分検討することは実際問題として不可欠であるが，本報告においては主として長期的な水素大量導入の形態を念頭におき，そこに至る水素の精製，貯蔵，輸送に関する技術的かつ環境的な可能性を検討することに重きをおくこととし，従って単純化のために，2次エネルギーとして最もクリーンである電気と水素のみに限定した。

これにより，長期的にみた水素需要規模の一応の上限を知り，必要とされる水素の精製，貯蔵，輸送システムの規模ならびに特性の一応の上限の線を引くこととした。短期的，および中期的な過程にあっては単に代替規模を数値的に想定するのみとし，現在システムとの接続については触れないことにした。

2－2　水素エネルギーシステムの空間的パターンの想定

周知のように，水素は燃料として天然には大量には存在せず，図2－1のように1次エネルギーを用春て化石燃料もしくは水から分離して得られる。クリーンエネルギーとしてクローズドサイクルで利用する目的からいえば水からの分離が究極的目標となる。

2次エネルギーを水素と電気に限定すると図2－2のようなエネルギーフローが考えられる。実際にはこれらのフローがすべて利用されるとは限らないが，エネルギーを有効かつ多目的に利用する傾向が今後とも強まると予想され，従って規模の大小はあるものの，図2－2のフローのほとんどが実用されうるものと推定される。



* Categorically defined as geophysical energy source

図2－1　エネルギー全体のフロー

図２－２　１次エネルギーからの水素および電力の製造系統

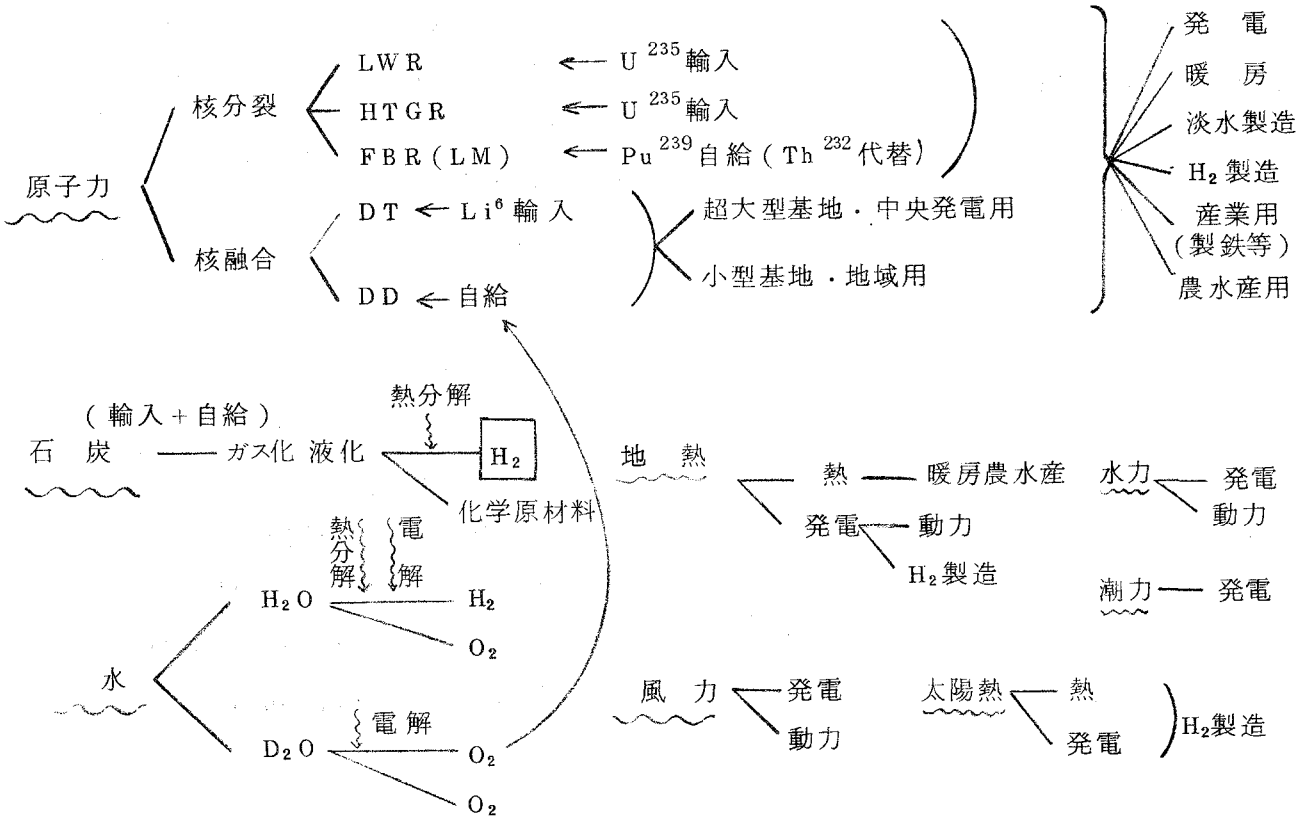
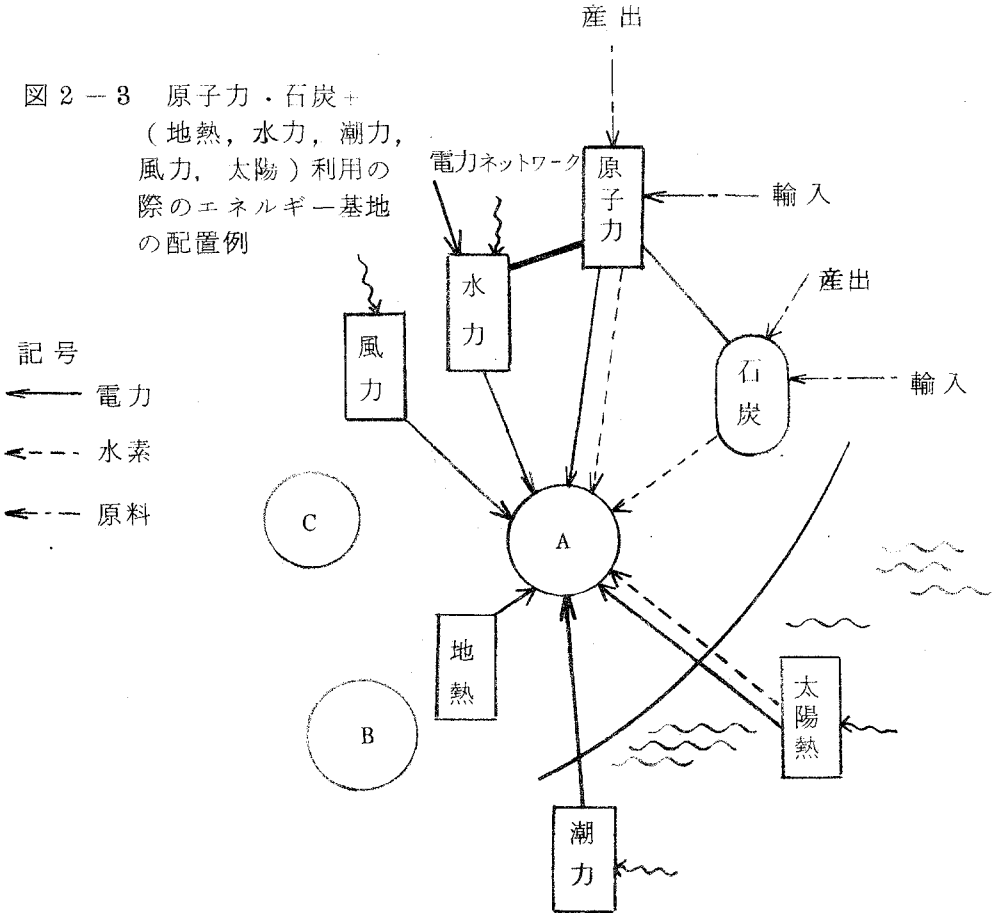


図２－３　原子力・石炭＋（地熱，水力，潮力，風力，太陽）利用の際のエネルギー基地の配置例



エネルギーフローには環境に対するインパクトが附随する。エネルギー利用者は，従って1次エネルギーの基地を立地上隔離しようとする傾向をもつ。換言すれば，1次エネルギーから2次エネルギーへの変換基地は立地上，経済的範囲で，可能なかぎり遠隔の低人口地域に設置することになる。ただし，将来は技術の進歩に伴って，こうした隔離を必要としない時期が来ることが十分に考えられる。

図2－3は現状からの延長線上で考えたわが国におけるエネルギー基地の配置の1パターンである。この例では，都市群に対し，原子力を中心とする遠隔基地より主要な電力－水素を輸送し，補助的に比較的近郊より他の1次エネルギーより得られる電力－水素（もしくは熱）を輸送する。

2次エネルギー製造のためのこれらの基地の機能とフローを図2－4に示す。

これらの基地では必要に応じたエネルギー貯蔵の能力を有するものとする。

都市又は都市群には図2－5のようなエネルギー集配のための中間基地を置く。このサイトでは小規模な1次エネルギーの変換機能ももたせ得るとする。図2－5ならびに図2－6の例では小規模な1次エネルギー変換装置の例として核融合炉（CTR）を想定している。

核融合炉は経済的には核分裂炉よりもさらに大型になる見通しが強く，小規模利用にはなお疑問はあるが，都市近郊における安全立地の観点からは可能性が高いという意味で例に挙げておいた。ただし，トリチウム拡散防止技術の確立が前提である。

中間基地においては，図2－6の分配センターを除いた部分に示される過程が行なわれる。ここでは主要な可能性がすべて示されており，実際にはこれらの中からフローの選択が行なわれる。

中間基地の規模は，都市群用であれば大規模となり，単一都市においては比較的小規模となる。

分配センターとは単一都市において，その中間基地から末端利用に至るまでの間におかれた中間的な貯蔵，分配機能をもつステーションである。その考え方の例を図2－7に示す。電力でいえば変電所，ガスでは

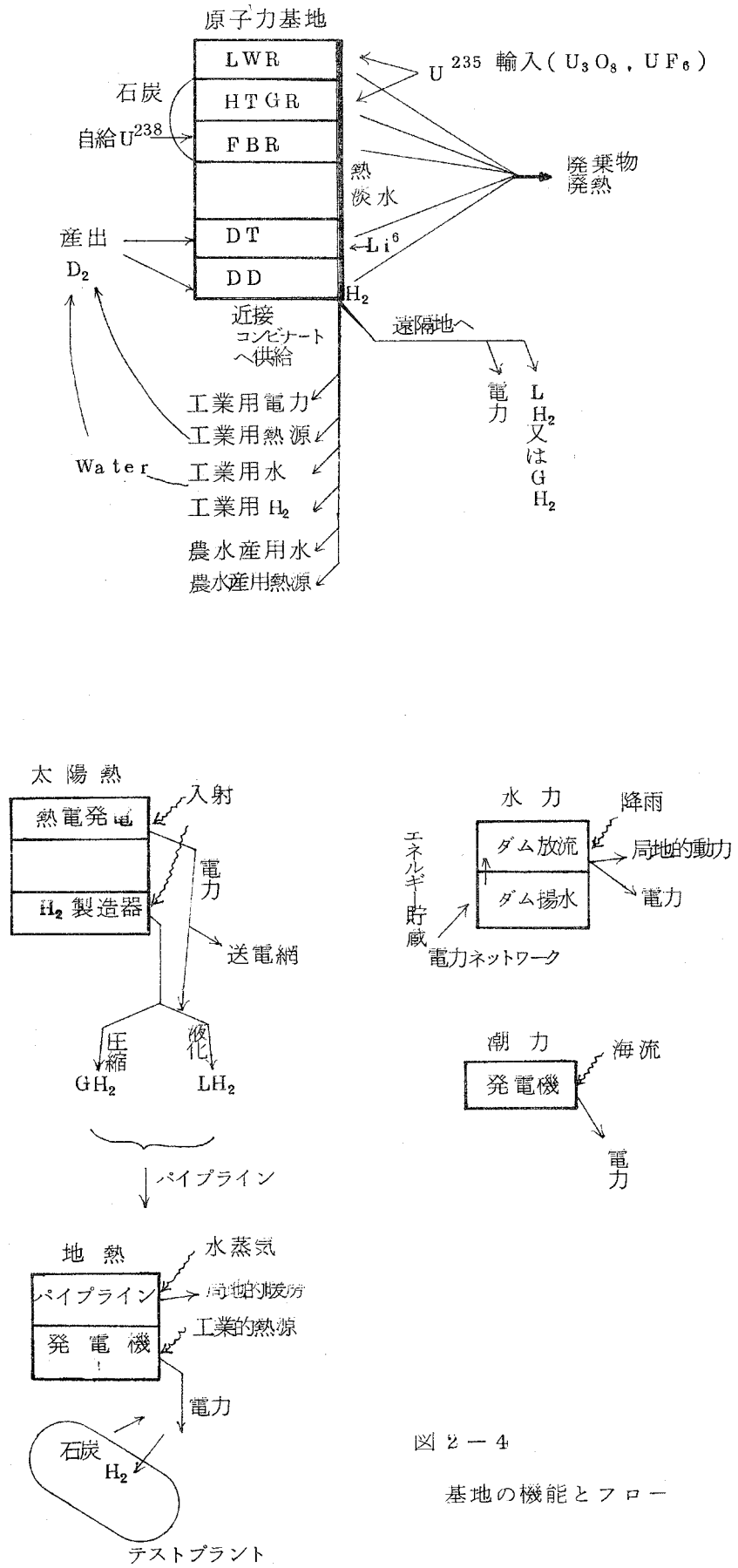


図 2－4

基地の機能とフロー

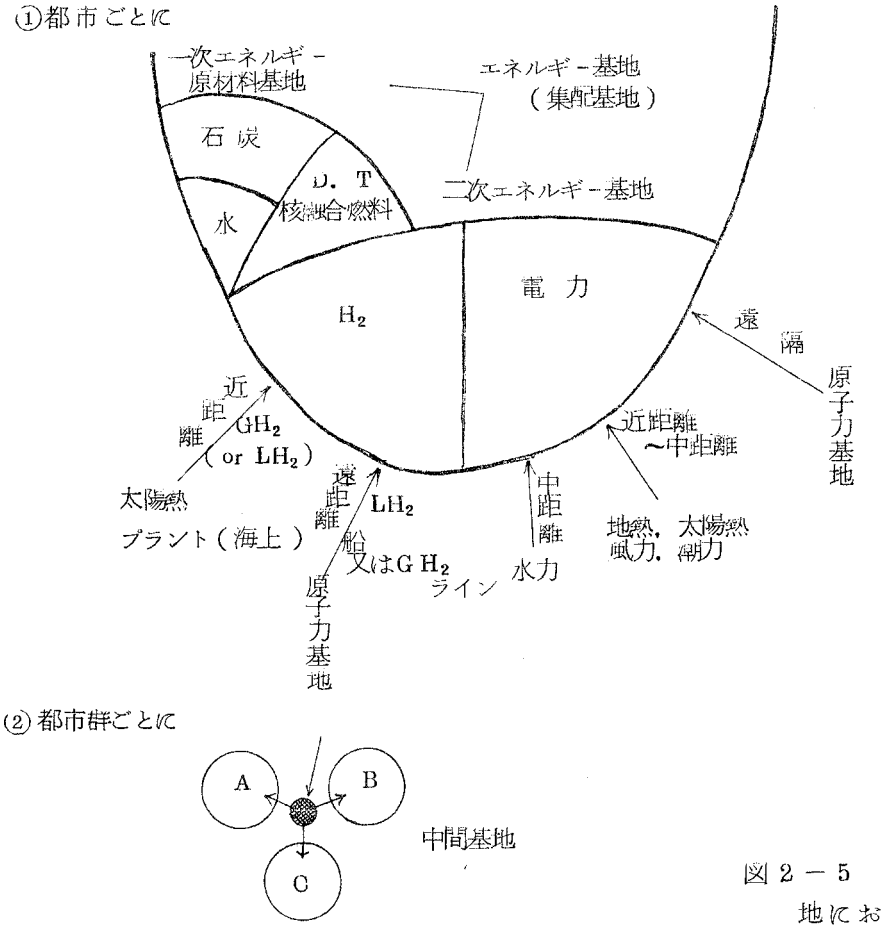


図２－５　２次エネルギー基地におけるエネルギーの形態フロー

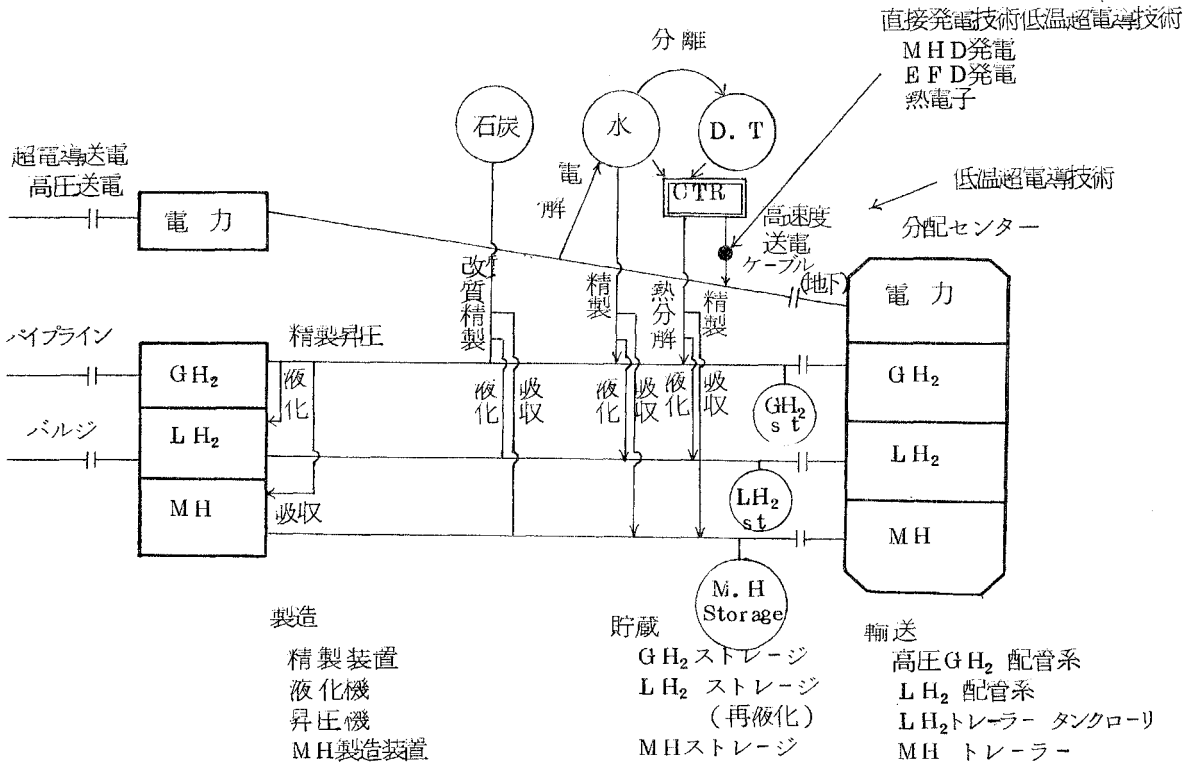


図２－６　分配センターまでのエネルギーフロー

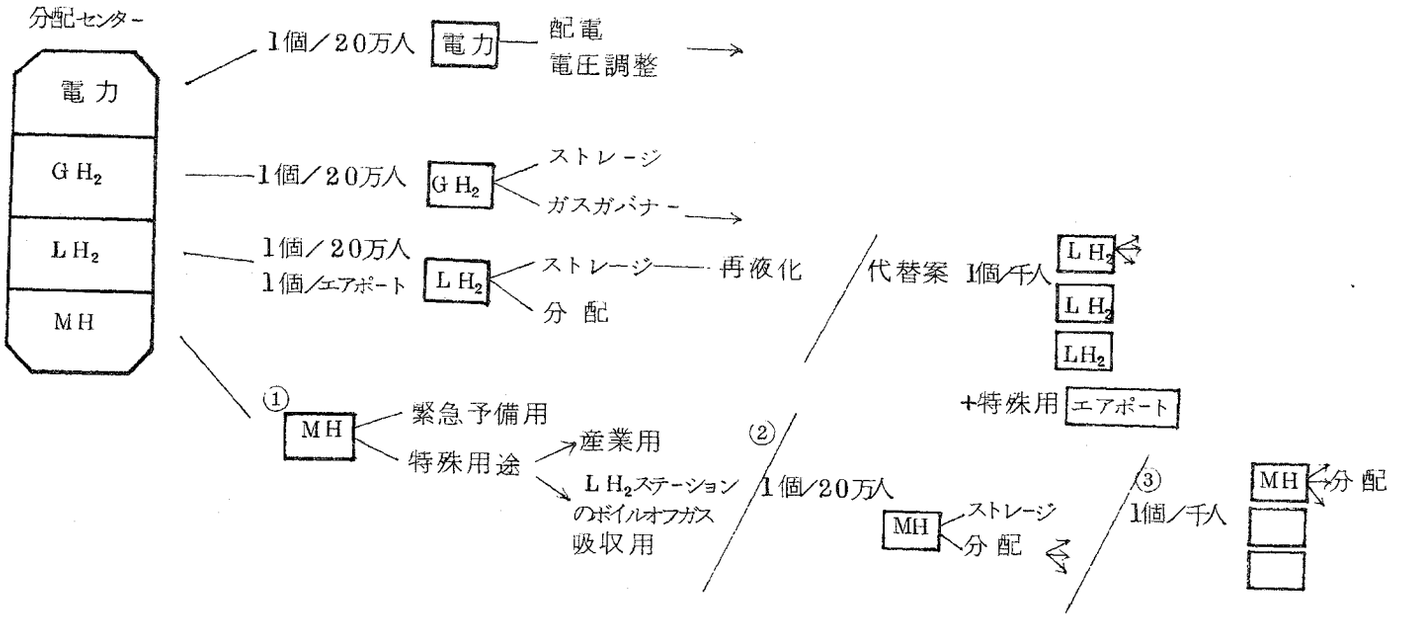


図２－７　分配センター代替案

大型ガバナーステーション，自動車燃料では現在のガソリンスタンドなどが分配センターに属する。分配センターにも各種の代替案が考えられる。

分配センターから末端利用までのフローを図２－８に示す。交通システムなど将来大巾に変化すると予想されるものはあるが，ここでは現状の利用形態からさほど離れない範囲で考えている。

将来大巾に変化すると予想されるものの一つに居住用のエネルギー利用形態がある。省エネルギー的な，そしてなるべく手近なエネルギーを自給的に確保する目的に沿った個人住宅，あるいは住宅群のアイデアが最近提唱されている。図２－９はそのような目的をもつ末端利用エネルギーフローの例である。外部からはラインもしくはバッチを通した電気－水素の流入と，太陽熱の流入とであり，設計により太陽熱の寄与の割合をかなり高めることができる。この例では水素燃料電池により，生活に必要な水の一部を自給する。

定常的なエネルギーフローについての検討と並行して，季節や時間による負荷の変動や緊急時のバックアップを検討する必要がある。これは一つには適正な貯蔵システムの問題であり，各サイト，分配センター，末端においていずれもエネルギー貯蔵の機能を含ませて考えなければならない。また緊急時の分配体制についても検討が必要であろう。

本報告書では２次エネルギーの消費地区を，都市で代表させたが，都市は人口と性格とでいくつかに分類した。人口では便宜的に３０万人，５０万人，１００万人程度に分け，性格の上からは工業都市，商業都市，文教都市，田園都市などに分類した。また日本の人口あたりの平均で構成される平均的性格の都市もモデルとして導入した。

これからの都市が将来，水素を年間いくら必要とするかについて試算した結果の一例は表２－１の規模欄にみられる。詳しい数字は資料§１－１に添付した。

２－３　水素の精製，貯蔵，輸送システム要素の総括的洗い出し

水素（気体，液体，金属水素化物）と電気からなるエネルギー流通システムを考え，そこに必要とされる主要なハードウエア，設計技術，および保安・制御等の技術について要素的な項目を表２－１に列挙した。

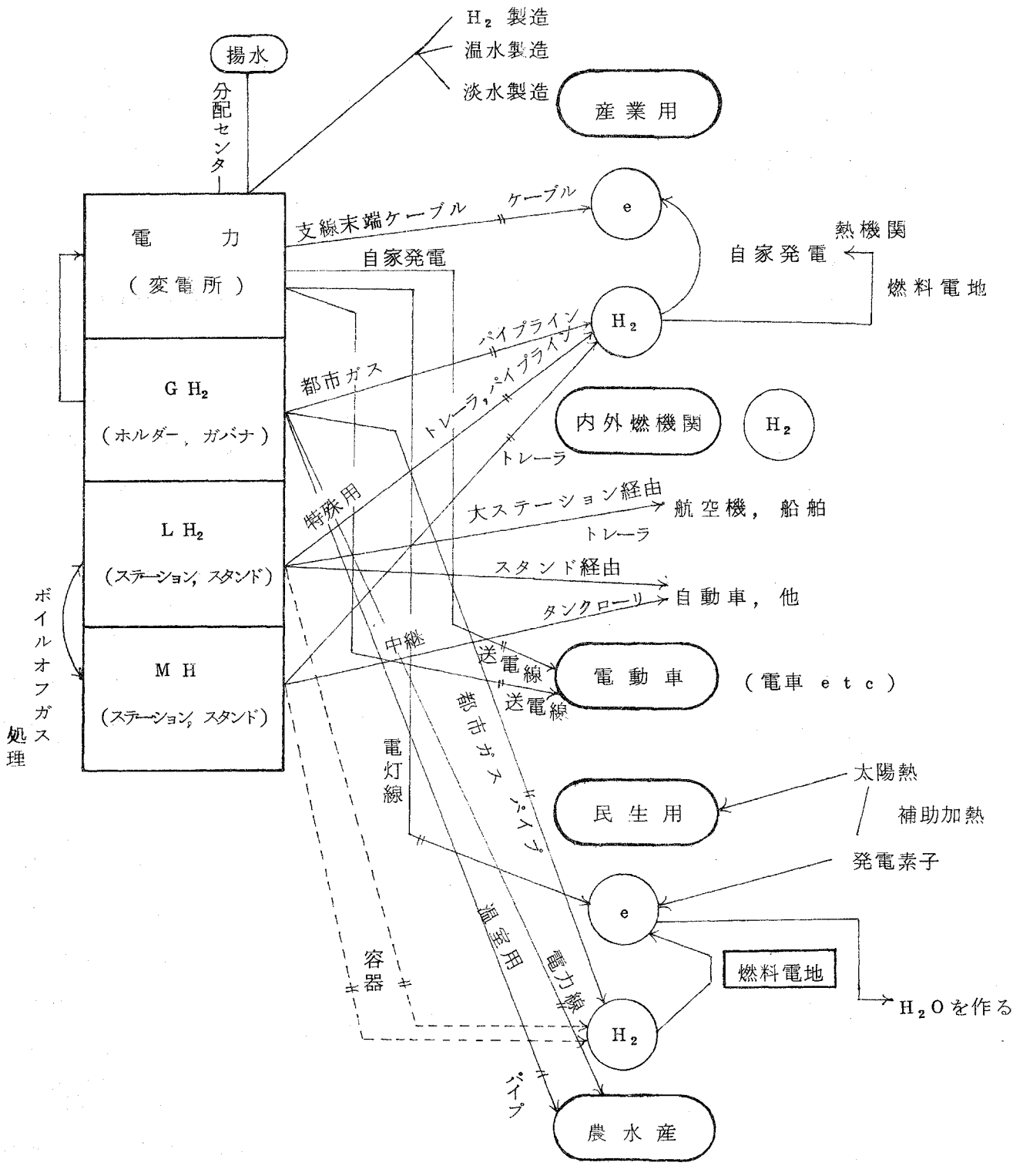


図 2 － 8　分配センターより末端への流通フロー

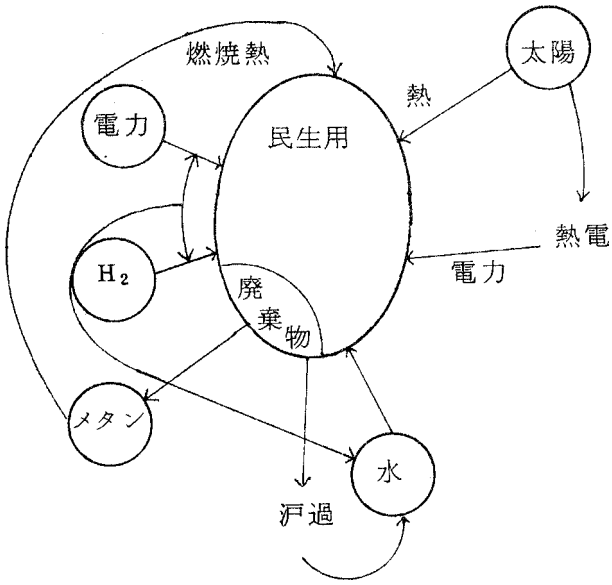


図 2 － 9　省エネルギー的な民生用のエネルギー利用の１形態

規模												
100万人／都市×10都市程度 H_2 1.3×10^9 Nm^3／day 電力 2.0×10^{7}KW 距離 300～500km	A 遠隔基地からの輸送	I 低温送電 ①冷凍液化機(H_2 N_2 He) ②低温ポンプ ③長尺クライオスタット ④断熱材 ⑤断熱支持材 ⑥ケーブル ⑦Joint(電気 真空 ターミナル) ⑧バルブ ⑨周辺機器 ⑩真空ポンプ II 超電導送電 III 超高圧送電 IV GH_2 ①コンプレッサー(精製機器) ②ガス分析器 ③パイプ&パイプ材料 ④バルブ・ジョイント(exansion) ⑤耐震，耐蝕 ⑥輸送(地中，地上，高架に必要な機器) ⑦ブースター ⑧断熱 〔アラスカパイプライン関連資料調査〕 〔設置場所と環況〕 ⑨バッファータンク ⑩周辺機器 V LH_2 (1)パイプライン輸送 ①～⑩低温送電参照 (2)バルジ ①バルジ(再液化機を含む) ②水素ディーゼルエンジン ③低温分配機器 (3)液体H_2貯蔵タンク	100万人都市程度 H_2 1.3×10^8 Nm^3／day 程度 電力 2.0×10^6 KW 〃 距離 基地内(<1km)	B 基地内での輸送	(1) LH_2 ① LH_2 貯蔵容器 ② LH_2 トレーラー ③低温ポンプ ④再液化器 ⑤低温エンジン ⑥発電機 ⑦蒸発機 ⑧圧縮機 ⑨中圧ガスホルダー ⑩ガバナー (2) GH_2 ①ガスホルダー ②精製機 ③液化機 (3) MH ①MH製造装置 ②加熱冷却源 (4)共通 ①分配配管系統 ②変電設備 (5)燃料電池 (6)水素火力発電 (7)石炭→gas ①石炭貯蔵庫 ②輸送車 ③ガス化プラント (H_2) ④精製機 (8)電気 H_2O 電解 H_2 ①水ポンプ ②電解装置 ③附帯槽類 ④海水淡水化装置 ⑤by-product処理装置	100万人都市程度 H_2 1.3×10^8 Nm^3／day 程度 電力 2.0×10^6 KW 〃 距離 5～20km	C サテライトまで(サテライトを含む)	(1)電力 ①超電導送電 ②低温送電 ③変電設備 (2) GH_2 ①パイプライン ②ガスホルダー ③着臭，着色装置 ④ガバナー ⑤周辺機器 (3) LH_2 ①パイプライン ②タンクローリー(大口，小口) ③都市間中距離輸送車輛 ④再液化装置 ⑤ガス回収装置(MH) ⑥ガス燃焼処理装置(　) ⑦貯蔵タンク ⑧分配系機器 (4) MH a) MHスタンド MHタンクローリーセンター	100万人都市程度 サテライト数ケ所程度 距離 1～5km	D サテライト→末端利用	電力 産業用 ケーブル 電動車 充電装置 民生用 ケーブル GH_2 産業用，民生用 パイプライン 〔要開発 valve, joint 安価 tight〕 LH_2 {産業用 内外燃機関 トレーラー タンクローリー 電動車 民生用…容器 MH 産業用 トレーラー 民生用 容器

表2－1　水素の精製・貯蔵・輸送システムにおける各種の主要要素一覧

本年度は，これらのうちさらに主要なものについて，技術の現状の調査と将来の展望を行なうと同時に，上述のエネルギーシステムパターンおよび需要規模を考慮しつつ，比較的に現実性の高いサブシステムを参考モデルとして構成し，それらについて考察を行なった。

上記の諸項目については次年度においてデータをさらに収集し，水素の精製・貯蔵・輸送システムの諸特性を評価するための入力データとして整備する。そのための検討内容を表２－２に示す。

種類（原理）	型式（条件）	材質	メーカー	目標値 向上ステップ 適正限界－現状技術の上限 性能	容量スケールアップ	現状と問題点 製造加工技術	目標値と実現可能性 信頼性 耐久性	問題と対策 安全性	設計式基準	新たに必要とするR&D（特に基礎的工学，技術の面で）－材料	コスト推定（R&D，設備投資運転費）	現状と問題点 システム技術	国産技術の目標見通し

表２－２　主要ハードウエアに対する必要検討事項

§3 精　製

3－1 概　要

現在工業的に行なわれているH_2ガス精製法を大別すると，次の4種類の方法が考えられる。

1）吸収法，2）吸着法，3）深冷分離法，4）拡散法

この中吸収法は最も大規模に行なわれているが，一般的には得られる製品水素の純度は余り高くない。深冷分離法は比較的高純度のH_2を得ることができるが規模は少し小さくなる。吸着法はこれに次ぎ，拡散性が最も高純度なH_2を作る方法であるが規模は極めて小さくなる。

これ等の精製法は単独に用いられる場合もあるが，通常は2～3の方法の組合せによって使用される。

H_2ガス精製のプロセスの選定には，原料ガスの製造法，即ち原料ガス中に含まれる不純物の種類，その濃度，原料ガスの温度，圧力等を考慮し，更に必要とする製品ガスの純度，温度，圧力等を考えに入れなければならない。そして最終的には，これらの要因の他に設備費，運転費からなる経済性を考慮した上で決定される。

3－2 精製法各論

3－2－1 吸収法

吸収操作は石油精製，石油化学，無機化学などの各所で応用されており，主として酸性ガスの除去に非常に有効な手段であり現在最も広く使用されている方法である。精製ガスの不純物濃度は1％程度が普通である。

この原理は吸収塔と再生塔から構成されており，原料ガスはまず吸収塔で，吸収剤（洗浄剤）と向流接触させ不純物を吸収除去する。この吸収塔の内部には，通常，充塡材又は各種研式のトレイが用いられ，物質収支，熱収支のバランスが取れる様に設計されている。

不純物を吸収した溶液は吸収塔下部から抜き出し，再生塔に導入される。この再生塔では溶解ガスをフラシィングあるいはストリッピングガスの送入により，あるいは加熱操作などにより除かれる。又再生された溶液は吸収塔に循環される。

吸収法はこのような原理に基づいて次の様に分類できる。

イ) 化学吸収法

アミン吸収　　MEA法，DEA法，ADIP法

炭酸カリ吸収　　ニューベンフィールド法，HI－PURE法，カタカーブ法

GIAMMARCO－VETROCOKE法

苛性ソーダ洗浄

ロ) 物理吸収法

メタノール洗浄　　レクチゾール法

水洗浄

その他　　ピュリゾール法，FLOUR－SOLVENT法，SELEXOL法

ハ) 物理及び化学吸収法の併用

スルフィノール法

化学吸収法とは水溶液状態で溶媒が化学結合により酸性ガスと反応し，錯体を形成し，飽和近くまで酸性ガスを吸収する性質を利用したものであり，再生は温度を上げ，圧力を下げる事により錯体が分解し，酸性ガスを放出する性質を利用したものである。

物理吸収法は主として有機溶媒が使用され，この有機溶媒の物理吸収により酸性ガスを除去する方法である。この除去は酸性ガス成分の分圧に直接的に比例して行なわれるので，かなりの量の酸性成分が存在する高圧ガスの処理に応用される。但し，溶媒価格が比較的高いので溶媒損失が少ない様な設計が必要とされる。表3－1にこれらの吸収法の概要を括めてある。

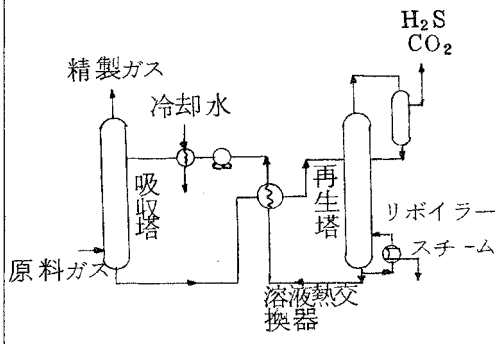
「現在水素製造プロセスにおいて採用されているほとんどが部分酸化法かスチームリフォーミング法であるが，この両法では除去すべきガスが異なるので採用される吸収プロセスも多少異なっている。

即ち，前者では重質油が原料の時でも原料の脱硫を行なわないので除去すべきガスは，CO_2，H_2S，COSなどであり，テキサコ社やシェル社の方法ではこれらガスを同一プロセスでCO_2とH_2S，COSに分けて取出す事ができるレクチゾール法が好ましいとしている。

後者では原料の脱硫を行なうのでCO_2を除去すればよい。これにはMEA法

表 3－1・A

プロセス名	エタノールアミン洗浄法	苛性ソーダ洗浄法
開発会社		
吸収法	化学吸収	化学吸収
吸収剤	① MEA(モノエタノールアミン) ② DEA(ジエタノールアミン)	NaOH 溶液（ 4～10％）
除去される不純物	H_2S, CO_2, SO_2（COS, CS_2, O_2, HCNは有害物質）	H_2S, CO_2, COS
運転条件	吸収塔　　再生塔	吸収塔
温度	常温　　110～120℃	＜50℃
圧力	＜70kg/cm² G　　1kg/cm²	＜70kg/cm²
不純物濃度 入口	CO_2 H_2S ＞3％	H_2S, CO_2 ＜1％
出口	CO_2 0.03～0.05％ H_2S数 ppM	H_2S 1ppM CO_2 ＜5ppM
特　徴	MEAは他のアミン溶剤に比して安価，安定性に優れているが腐蝕，溶剤損失フォーミングについて注意必要，再生に要するスチーム消費量，冷却水が多い。 MEA濃度は15～20wt％を限度とする。 MEAの劣化あり	苛性ソーダ洗浄は他の洗浄プロセス（MEA，加圧水，熱カリ洗浄）の次にガスの最終精製として　用いられ酸性化合物や不純物の最終のトレースに至る精製を行なう。 リッチ溶液は再生出来る。使用済の溶液は直接放流する事が出来ないので硫酸などで中和する。
主要反応	$R-NH_2 + H_2S \rightleftarrows RNH_3HS$ $R-NH_2 + H_2O + CO_2 \rightleftarrows RNH_3 \cdot HCO_3$	$CO_2 + 2NaOH \rightarrow Na_2CO_3 + H_2O$ $H_2S + 2NaOH \rightarrow Na_2S + 2H_2O$ $COS + 4NaOH \rightarrow Na_2CO_3 + Na_2S + 2H_2O$
プロセスフロー	MEA法	苛性ソーダ洗浄プロセス



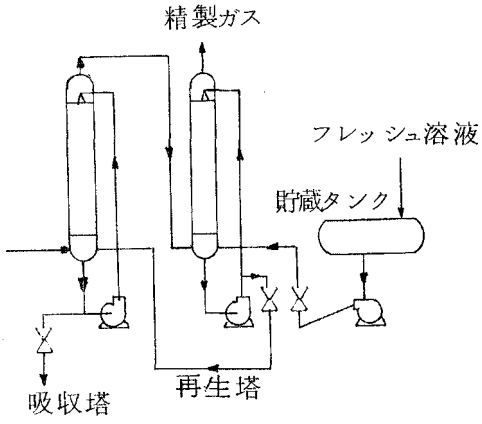
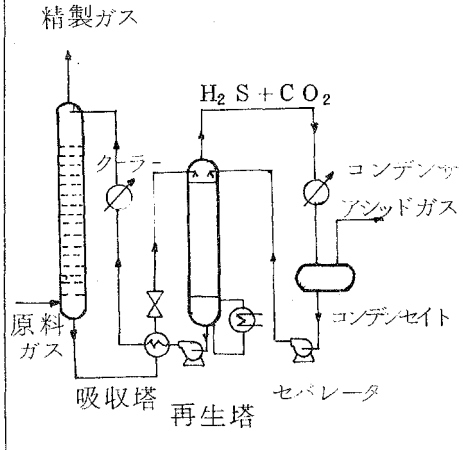


表３－１・Ｂ

プロセス名	ＡＤＩＰ法	ニューベンフィールド法
開発会社	SHELL	BENFIELD社（米国）
吸収法	化学吸収	化学吸収
吸収剤	ＢＩＰＭ（ジイソプロパノールアミン）	K_2CO_3(20～30%溶液) DEA(ジエタノールアミン 3%溶液) 炭素鋼の腐蝕剤 V_2O_5
除去される不純物	H_2S, CO_2, COS（HCNは有害物質）	CO_2, H_2S COS
運転条件	吸収塔　再生塔	吸収塔　再生塔
温　度	常温　110～120℃	＞110℃　115℃
圧　力	5～20 kg/cm²	5～40 kg/cm²　0.4 kg/cm²
不純物　入口	＞3%	＞3%
出口	H_2S ＜1ppM　COS ＜10ppM	CO_2 0.05～0.1%
特　徴	8～10 VoL% H_2Sは1ppM以下に出来る。酸素含有量は溶液のロスを防ぐため，1VoL%以下に保つ必要がある。又HCNは干渉を起すためＡＤＩＰ洗浄の前に除く必要がある。	炭酸カリ水溶液を沸点近くの高温での吸収に使用しているので冷却水および再生に必要な熱量を節約出来，又重炭酸カリの析出防止に役立つ。 アミン系プロセスとの違いは吸収温度が高いためリーン溶液とリッチ溶液の熱交換器を設けずリーン溶液の吸収塔への張込みを冷却器を通した低温液と冷却しない高温液に分けて吸収塔温度を調整している点である。
主反応	$R_2NH + H_2S \rightleftarrows R_2NH_2HS$ $R_2NH + H_2O + CO_2 \rightleftarrows R_2NH_2HCO_3$	$K_2CO_3 + CO_2 + H_2O \rightleftarrows 2KHCO_3$ $K_2CO_3 + H_2S \rightleftarrows KHCO_3 + KSH$
プロセスフロー		500～2000ppMのCO_2精製濃度を目的としたプロセスフロー



シェルＡＤＩＰプロセス

ニューベンフィールド法

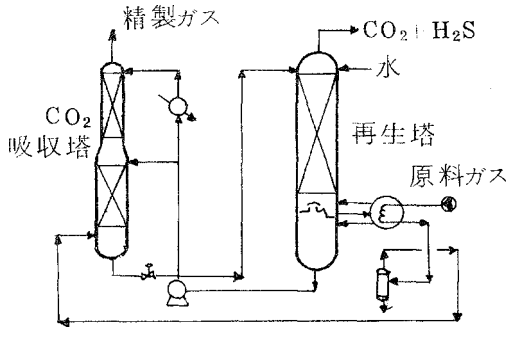
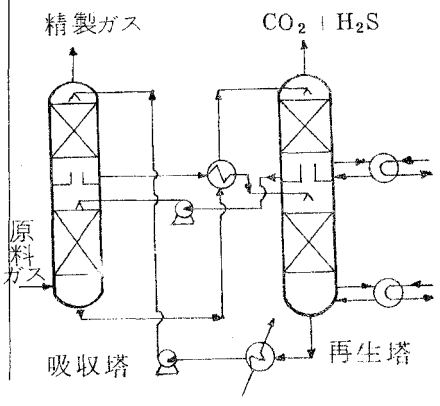


表3－1・C

プロセス名	HI－PURE 法	カタカーブ法（CATACARB）
開発会社	BENFIELD社　（米国）	EICKMEYER & ASSOCIATES(米国)
吸収法	化学吸収	化学吸収
吸収剤	K_2CO_3（20～30%溶液）D　3%溶液（ジエタノールアミン）炭素鋼の防蝕剤 V_2O_5	K_2CO_3 カタカーブ触媒（アルカノール硼酸塩）防蝕剤 メタバナジン酸
除去される不純物	CO_2，H_2S，COS	H_2S，CO_2
運転条件	吸収塔　再生塔	吸収塔　再生塔
温　度	＞110℃　115℃	70～100℃　100～110℃
圧　力	30 kg/cm²G　0.4 kg/cm²	20～30 kg/cm² G　0～0.4 kg/cm² G
不純物　入口		
出口	H_2S ＜1ppM　CO_2 数＋ppM	CO_2 0.05～0.1%　H_2S 数 ppM
特　徴	炭酸ガスを数10ppM まで除去可能としたプロセスであり原料ガスの大部分の CO_2，H_2S がニューベンフィールド溶液との向流接触により吸収塔の下部充塡層で吸収される。残 CO_2 は同吸収塔の上部充塡層で塔頂からのDEA液で吸収され所定の濃度まで CO_2 が除去されたガスが得られる。 CO_2 を吸収したニューベンフィールド溶液およびDEA溶液は同再生塔で別々に再生できる。	熱炭酸カリを使用している点はニューベンフィールド法と同じであるが，吸収能力，放散能力を増大させる。 カタカーブ触媒，炭酸カリによる腐蝕を防止するカタカーブ防蝕剤を含んでいる。 再生塔で所定レベルまで再生されたリーム溶液は中段，下段から取出されポンプ昇圧後吸収塔中段，上段に循環される。リーン溶液の一部はカーボンフィルターに通入され副生した重合物を除去される。
主反応	$K_2CO_3 + CO_2 + H_2O \rightleftarrows 2KHCO_3$ $K_2CO_3 + H_2S \rightleftarrows KHCO_3 + KSH$	同　左
プロセスフロー	Hi－Pure Process	カタカーブ法



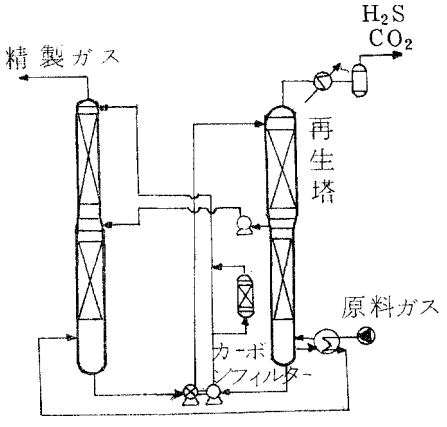


表3－1・D

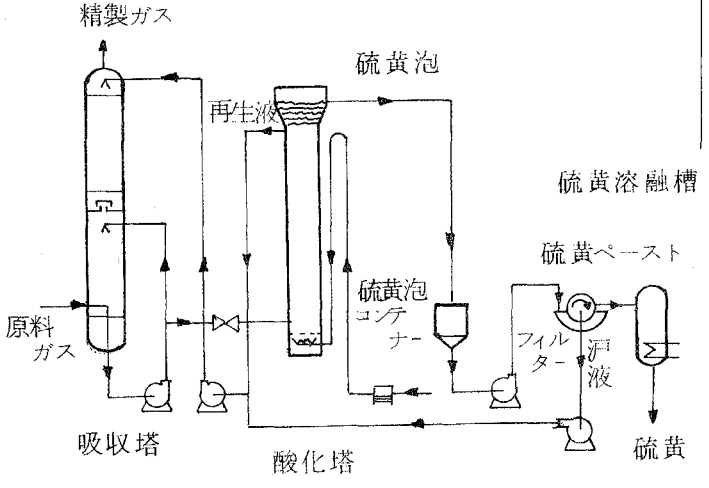
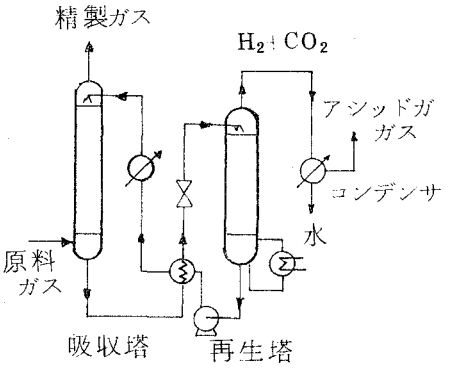
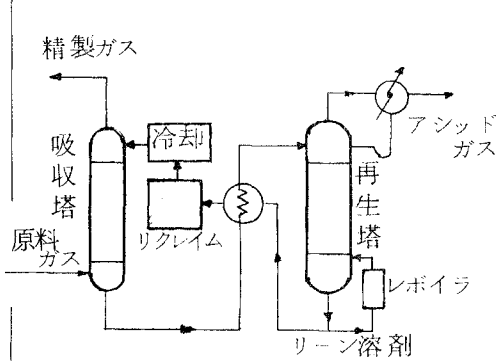
プロセス名	GIAMMARCO－VETROCOKE法	ALKACID
開発会社	VETROCOKE社（イタリヤ）	BASF社（西ドイツ）
吸収法	化学吸収	化学吸収
吸収剤	NA_2CO_3（K_2CO_3）As_2O_3	①アルカジィッドM（メチルアラニンカリ） ②アルカジィッドDIK（N－ジメチルグリシンカリ）
除去される不純物	H_2S　CO_2	H_2S　CO_2
運転条件	吸収塔　再生塔	吸収塔　再生塔
温度	60～70℃　115℃	50～60℃　100～110℃
圧力	＞6 kg/cm²	常圧
不純物　入口		
出口	H_2S ＜1ppM　CO_2＜0.1%	H_2S　10～50ppM
特徴	吸収液に砒素化合物を使用してCO_2に対する吸収速度，放散速度を高めてある。ニューベンフィールド法に比べて低温で吸収可能但し砒素化合物に対する健康管理問題及び廃液に対する公害の問題あり	原料ガスは吸収塔でアルカジィッド溶液で洗浄しH_2S，CO_2が除かれる。リッチ洗浄液は再沸騰させる事によって再生を行わせる。アルカジィッドM溶液はH_2S，CO_2の除去に用いられ，アルカジィッドDIKはH_2S及びCO_2の選択吸収に用いられる。
主反応	$6CO_2+2K_3AsO_3+3H_2O \rightleftarrows 6KHCO_3+As_2O_3$ $CO_2+K_2CO_3+H_2O \rightleftarrows 2KHCO_3$ 吸収　$K_3AsO_3+3H_2S \rightarrow K_3AsS_3+3H_2O$　$RCHNH_2COOK+H_2S \rightleftarrows RCHNH_2COOH+KHS$ 熱成　$K_3AsS_3+3K_3AsO_4 \rightarrow 3K_3AsO_3S+K_3AsO_3$ 酸性化　$3K_3AsO_3S \rightarrow 3K_3AsO_3+3S$ 酸化　$3K_3AsO_3+\frac{3}{2}O_2 \rightarrow 3K_3AsO_4$	
プロセスフロー		 アルカシッド

表3－1・E

プロセス名	セレクゾール法	スルフィノール法
開発会社	ALLIDE CHEMICAL社(米国)	SHELL 社
吸収法	物理吸収	化学吸収、物理吸収の併用
吸収剤	ジメチルエーテルポリエチレングリコール、ジイソプロパノールアミン	アルカノールアミン(ジイソプロパノールアミン) スルフォラン($C_4H_8SO_2$)
除去される不純物	CO_2, H_2S, COS, メルカプタン, CS_2	CO_2, H_2S, COS, メルカプタン, CS_2
運転条件	吸収塔　再生塔	吸収塔　再生塔
温　度	-10℃常温	40℃　50～70℃
圧　力	34 atm	>10kg/cm² 常圧
不純物　入口		
出口	CO_2 0.3～0.5 VOL%　H_2S 1ppM	
特　徴	吸収剤としてSelexol, 及びSelexol Aの2種があり Selexol—AはSelexolよりアシッドガスの精製に秀れている。これはジイソプロパノールアミンが添加してあるためである。 COS, CS_2, メルカプタンによる溶媒劣化がなく効果的にこれらを除去する。 溶媒コストが高い	アルカノールアミンは化学的にスルフォランは物理的に酸性ガスを吸収する。 COS, CS_2 メルカプタンの除去率も高く溶媒の循環率が低くて経済的である。 欠点としては溶媒中のスルフォランの価格が比較的高い。
主反応	———	
プロセスフロー	スルフィノール法	同　左



Selexol-A プロセス

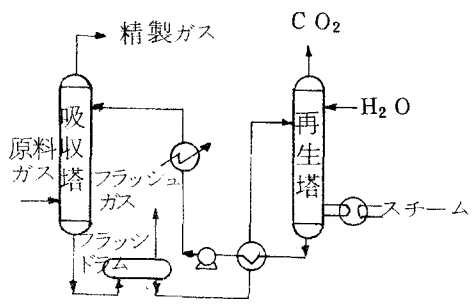
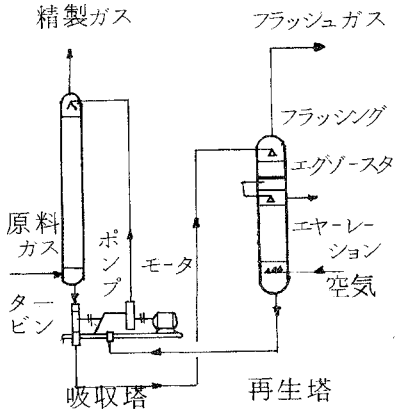


表3－1・F

プロセス名	加圧水による洗浄法	レクチゾール法
開発会社		LURGI 社（西独）
吸収法	物理吸収	物理吸収
吸収剤	H_2O	深冷メタノール
除去される不純物	CO_2，H_2S	H_2S，CO_2，COS，NH_3，HCN，H_2O
運転条件	吸収塔　　再生塔	吸収塔　　再生塔
温　度	常温以下	0～70℃　　80～100℃
圧　力	＞21 kg/cm² G	20～120 atm
不純物　入口	＞3％	CO_2　H_2S　COS　＞10％
出口	1％程度	CO_2　＜100ppM　H_2S　COS　数ppM
特　徴	有機硫黄化合物，ガム状生成物，HCNなどは本法で完全に除去できない。	メタノールの吸収能は低温になる程大きく又高圧になる程大きくなる。この性能を利用したのがこのレクチゾール法である。 メタノールは腐蝕性がなく冬場にプラントを停止した場合でも凍結せず低価格で購入できる。
主反応	――	――
プロセスフロー		



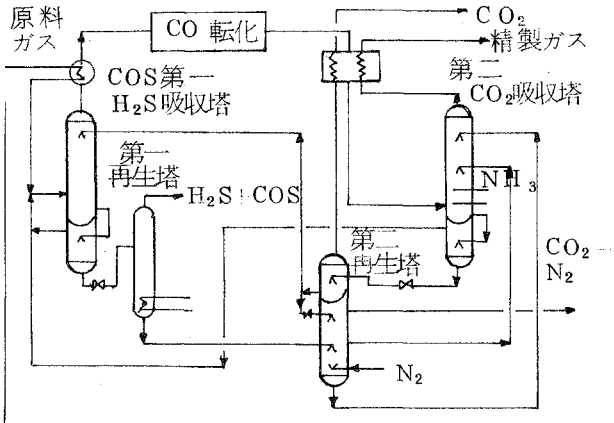
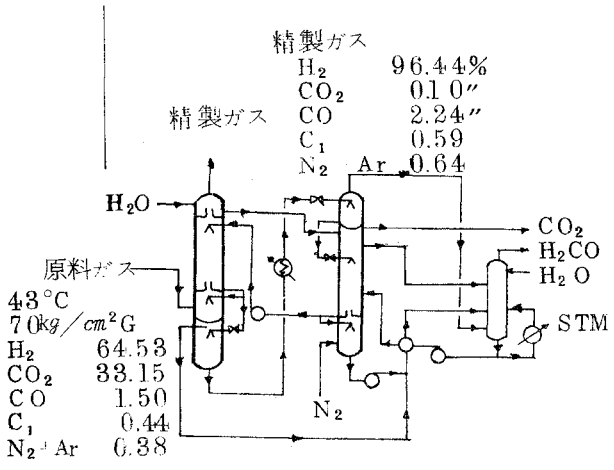
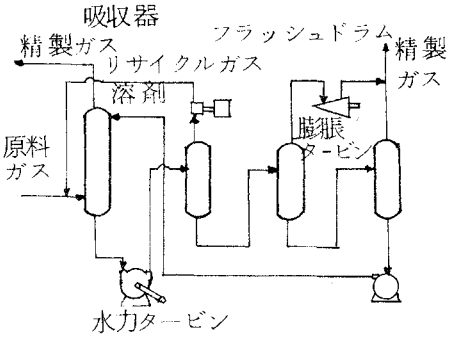


表3－1・G

プロセス名	ピューリソール法	FLOUR SOLVENT法
開発会社	LURGI社（西独）	FLOUR社
吸収法	物理吸収	物理吸収
吸収剤	NMP（n－メチルピロリドン）	無水プロピレンカーボネート
除去される不純物	H_2S　CO_2　水分	H_2S　CO_2
運転条件	吸収塔　再生塔	吸収塔　再生塔
温　度	40℃　140℃	
圧　力	70 atm　15 atm	＞5 kg／cm² 常　圧
不純物　入口		
出口	CO_2　＜2%　H_2S数 ppM	
特　徴	溶剤にNMPを使用している為常温で操作可能中圧（PCO_2＝10 ata）以下ではレクチゾール法に劣るがそれ以上の高圧ではCO_2の吸収力が大となる。NMPの使用利点は低粘性，熱安定性，無腐蝕性及び溶剤の安定受入れが容易なことである。	使用溶液中に存在する低い水分濃度とプロセス系全体を通しての低温操作により腐蝕の心配は全くないので炭素鋼が使用できる。
主反応	――	――
プロセスフロー	部分酸化法によるH_2製造装置に応用された例 ピューリソール法	Flour Solvont 法





熱炭酸カリ法（ベンフィールド法，カタカーブ法など）などが広く用いられている。勿論両者共COを含有している為，目的によっては水蒸気CO変成を更に行なう場合が多い。

近来，水素製造装置は大型化の一途をたどっており，この大型化に適するプラントはナフサのスチームリフォーミングが最も経済的であると言われている。

この方法による単位装置能力は現在200万Nm^3／日位（純水素として）のものが稼動しており，これに必要な脱炭酸装置も単一装置で処理されているのが現状である。

3－2－2　吸着法

吸着法は従来小容量のガス精製あるいは原料中不純物濃度が比較的低い場合に用いられて来たが現在では深冷分離法，Pd－拡散法などと共に主として石油化学，石油精製装置などから副生する低純度の水素あるいはナフサ，アンモニア，メタノールなどの分解によって生じる低純度の水素から高純度の水素を回収するのに用いられる様になった。

吸着法は吸着操作と脱着操作の組合せが出来る様,通常2つ以上の塔が並べてあり一塔が吸着している間に他の塔で脱着操作を行ない，この切換サイクルで使用される。

脱着は今まで高温のパージガスによって行なわれるサーマル・スウィングサイクルが主であったが，この方法だと吸着剤の再生にかなりの時間がかかり（2時間から48時間程度），又不純物濃度が高くなった場合吸着塔がかなり大きくなってしまうので最近では，吸着を高圧力で行ない低圧力戻す事により脱着を行なうプレッシャー・スウィング・アドソープション（PSA）方式が取られる様になった。

この方式では脱着のために加熱は必要でなく圧力を下げ少量のパージガスを流すだけで再生が出来るので短時間（10分程度）で切換えが可能になり，さらに数10％の不純物でも装置が大きくならないで済むのが特徴である。

次に吸着法の原理について述べる。プレッシャー・スウィング・アドソ

ープション（PSA）とサーマル・スウィング・アドソープション（TSA）の原理図は図３－１の通りである。

横軸に被吸着物の分圧，縦軸に単位重量当りの吸着剤に吸着する吸着量が示してある。

図中には常温及び高温の２本の等温吸着曲線が示してあり，TSAの場合はこの２本の高温及び常温における吸着量の差を利用し，常温で吸着した不純物を高温にすることによって脱着する。これに対し，PSA法では常温の等温線上で圧力を変化させる事により吸着，脱着を行なう。

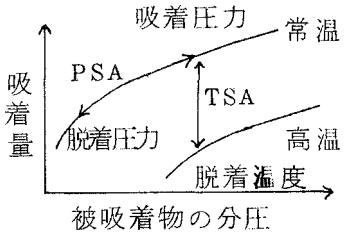


図3－1　PSAとTSAとの比較

この原理に基づいて吸着法は不純物の精製を行なう訳であるがPSA法においては原料ガス中の不純物の種類，量に応じて適当な吸着剤を選ぶ事が重要な問題である。これによって吸着塔の大きさ，切換時間，製品純度などが決まってくる。

この吸着剤には通常モレキュラーシーブ，活性炭，シリカゲルなどがよく用いられる。

又，このPSA法により除去する不純ガスは表３－２の通りである。

表３－２　PSAにより除去できる不純物

不純物の種類	沸点（760mmHg）(°C)	不純物の種類	沸点（760mmHg）(°C)
N_2	−195.8	C_3H_8	−42.1
CO	−191.5	NH_3	−33.4
A	−185.7	CH_3OH	64.5
CH_4	−161.5	H_2O	100
C_2H_4	−103.7	C_4H_{10}～C_8H_{18}	−0.5～125.7
C_2H_6	−83.6	ベンゼン	80.1
CO_2	−78.5	トルエン	110.6
C_2H_2	−83.8	キシレン	38.4～144.4
H_2S	−60.3	エチルベンゼン	136.2
C_3H_6	−47.7	スチレン	145.2

このようにPSA法では広い沸点範囲の不純物を同時に除去する事が出来，しかも原料ガスの水素純度が40～90％と低い場合でも99.999％まで精製する事が可能であるとされている。

一般的に用いられているフローシートを図3－2に示す。PSA法では2本以上の吸着塔を並列に並べてこれをスキット上にユニットとして組立ててあり，これらの吸着塔での吸着脱着操作を切換えによって順次行ない，不純物を除去する。

吸着塔のサイクル切換えは自動的に行なわれ，1塔当りの吸着時間は1分～10分間位なので自動切換弁は非常に寿命の長いものが選ばれる。これら塔の材質はカーボンスチールである。

原料ガス圧力は経済的には14～42 kg/cm²Gであり，製品水素ガスはそれより0.1～1.0kg/cm²G低い圧力で得られる。表3－3に2塔式及び4塔式での水素回収率を示した。このように4塔式の方が回収率が良く50～90％の割合で水素ガスが回収できるが勿論これは原料ガスの不純物の濃度操作条件によって変化する。

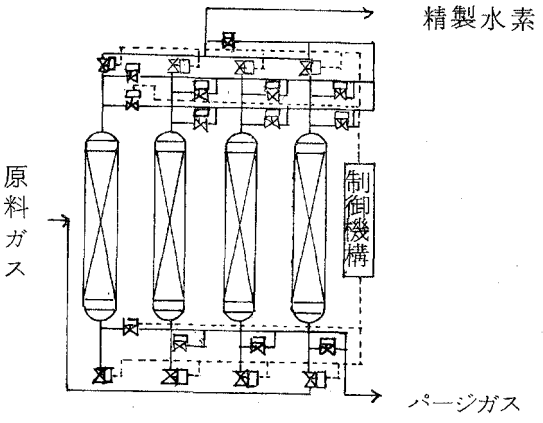


図3－2　PSA装置，フローシート

表3－3　2塔式と4塔式の回収率の比較

	2塔式	4塔式
原料中の水素量	100	100
パージに使用される製品量	10	0
加圧に使用される製品量	40	25
製品水素量	50	75

現在吸着法により水素を高純度化するプロセスはエッソ・リサーチ・アンド・エンジニアリング（ERE）とユニオン・カーバイト・コーポレーション（UCC）によって開発されており，14万Nm³／日程度（製品水素として）の装置が稼動中である。

3－2－3 深冷分離法

この方法は吸着法，Pd－拡散法などと同様，低濃度の水素ガスから水素を高純度に採取する方法であり，吸着法，Pd－拡散法に較べて比較的大容量のガスを処理するに適している。（一般的には5000～6000NM^3/H以上の原料では吸着法，Pd－拡散法よりすぐれていると言われている。）

原料となるガスは当然，水分，炭酸ガス，硫黄化合物，重質炭化水素などを含んでいるので低温で分離する場合はこれら不純物が凝固し，熱交換器，配管で閉塞する可能性があるので，あらかじめ除去しておく必要がある。この前処理工程は前章で述べた吸収法，吸着法などが用いられる。即ち，水分，H_2S，CO_2などを吸着法により除去したり，酸性ガスをアミン吸収液あるいは炭酸カリ吸収液を使用して吸収除去する方法である。

このような前処理工程を経て来た原料ガスは低温での水素回収工程即ち，深冷分離工程に入る。

この工程は承知の如く水素と他の成分を揮発度の差を利用して分離する方法であり，原料ガス中の高沸点成分が凝縮する温度まで原料ガスを熱交換器で冷却し，沸点の差で水素ガスと残留液とに分け，この残留液を水素と共に再び熱交換に戻し原料ガスを冷却した後常温で回収する方法である。

この方法は，Joule-Thomson 効果或は断熱膨脹を利用して必要な寒冷源を得ており，前者は原料ガスと製品水素残ガスの圧力差により生じ，後者は膨脹ガスタービンなどで行なわれる。

この分縮による水素回収は原料組成，圧力などにより，又，必要とされる製品水素の純度，圧力，収率などによりプロセスが多少異って来る。

図3－3は一番簡単なプロセスで，分縮に必要な寒冷は残ガスの Joule-Thomson 効果だけによって得られるものである。

熱交換器で原料ガスは分離ガスと向流熱交で冷却され，生成したガス，液混合物はセパレーターで分離される。ここから出た凝縮液はコントロール弁により大気圧よりわずか高い圧力まで膨脹し，温度はさらに冷却する。熱交換器のシェル側より送り出す。熱交温端では約5°Cの温度差で気液分離後の水素ガスが熱交換器管側を通って減圧する事なく製品となる。

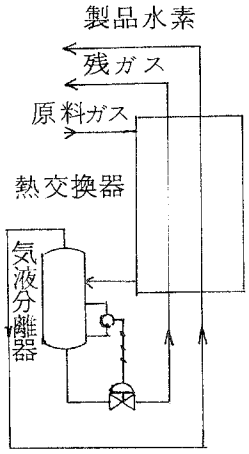


図３－３　分縮による水素回収

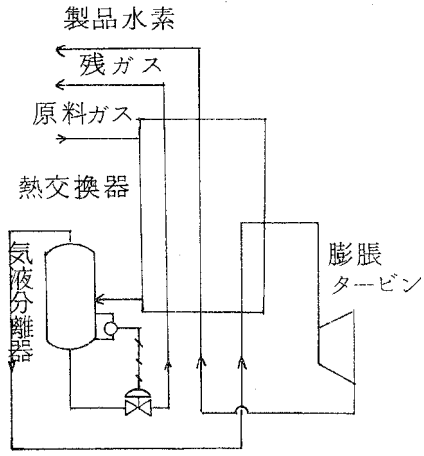


図３－４　膨張タービン使用水素回収

もし Joule-Thomson 効果だけでは不充分の場合，即ち原料組成中の水素が多い場合や残ガス圧力を高い状態で回収しなければない時には膨張タービンや循環サイクルにより寒冷発生を得る。即ち図３－４では膨張タービンを用い水素の部分凝縮を行なう方法であり，図3-5は残ガスの一部をリサイクルし，再圧縮，Joule-Thomson 膨張により寒冷源を得る方法である。

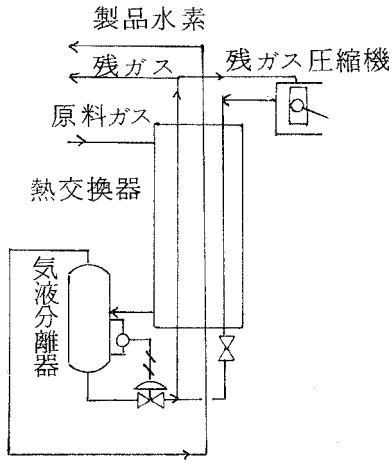


図3－5　残ガス循環による水素回収

図３－６に石油精製オフガスから水素を回収する方法の１例を示す。水素６０～７０％を含んだ原料ガスが，まず乾燥器を通過し，水分を除かれた後，熱交換器，フロン冷却器を通過し－５０°C程度まで冷却される。ここで原料中に含まれている H_2S，CO_2 などを除去する為にレクチゾール洗浄塔に入る。この洗浄剤にはメタノールを用いてあるが，これは低温度のメタノールに対して H_2S，CO_2 がよく溶解する性質を利用したものであり，このような低温分離装置に組み合わせる場合に有利である。

さらに精製ガスは熱交換器を通過して温度を下げ凝縮液とガスに分離され

る。凝縮液は残ガスとして，ガスは95％程度の水素とし熱交換器に戻された後回収される。

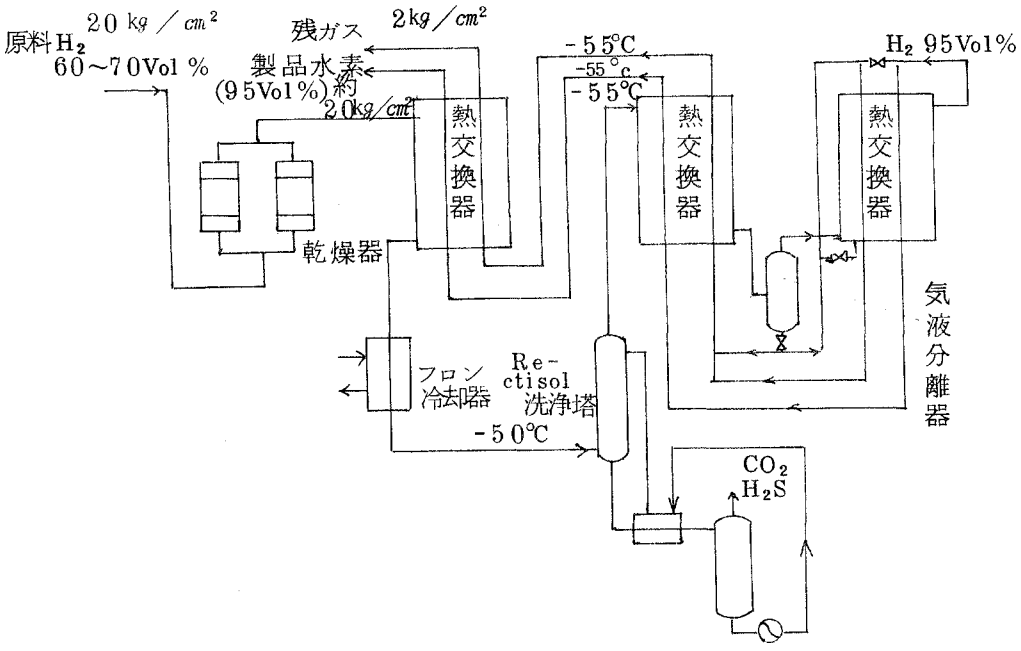


図3－6　水素深冷分離装置

以上述べたプロセスは原料ガス及び製品水素の状態により選定される訳であるが一般的には98％以下程度の純度を得る方法である。

これよりさらに高純度の水素が必要な時にはこのプロセスの後にメタン，プロパンなどを用いた低温洗浄法やモレキュラー　シーブ，シリカゲル，活性炭などを用いた吸着法の組合せが考えられる。

低温洗浄法は水素に含まれている少量の不純物を低温で吸収液と接触させて除去する方法であり，この吸収液にはメタン，プロパンなどが用いられる。

その理由はメタン，プロパンが低温で水素の溶解度が低く，低沸点不純物をよく溶解し，それ自身の蒸気圧が低い性質を利用したものである。

図3－7にメタン洗浄，プロパン洗浄の後吸着法を用いて水素精製を行なう時のフローシートを示す。又表3－4にはその時の原料とメタン洗浄，プロパン洗浄により精製された水素の純度が示されている。

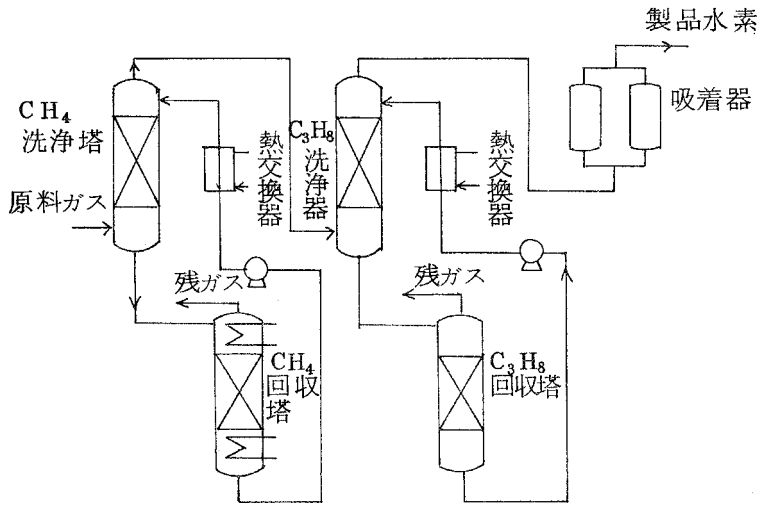


図 3 − 7　低温洗浄法による高純水素精製装置

表 3 − 4　CH_2 および C_3H_8 洗浄塔性能

	原料	塔頂ガス		製品	残ガス	
		CH_4 洗浄塔	C_3H_8 洗浄塔		CH_4 洗浄塔	C_3H_8 洗浄塔
圧力 kg/cm² G	21	20.9	30.8	20.7	0.2	0.5
温度 °C	−180	−180	−186	−185	−180	−123
組成 mol %						
H_2	95.6	98.996	99.99	99.999	26.9	63
N_2	0.4	30 ppm	30 ppm	1 ppm	8.5	10 ppm
CO	1.9	10 ppm	10 ppm		36.0	25 ppm
CH_4	2.3	1.0	60 ppm		28.6	32.0
C_3H_8			negl.			100 ppm
	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0

即ちメタン洗浄塔に入った原料ガスは CO, N_2 及び CH_4 が除かれ，さらにプロパン洗浄塔でさらに 1 %程度残存している CH_4 を 60 ppm まで除去し，これを吸着器を通す事により不純物は 1 ppm 程度まで除去される。

現在これら深冷分離法は Linde AG, Air Products and Chemicals など多数の会社で実績があり，20,000 NM^3/H 程度の容量のものが稼動している。

3－2－4　拡散法

隔膜の拡散透過を利用して水素を精製する方法のうち現在工業的規模で行なわれているのはパラジウム合金膜によるのみであり，このパラジウム合金膜による精製法は吸収法，深冷分離法と較べて比較的小容量（通常600NM³/H以下）の水素を精製するのに適しており，その精製純度が非常に高く99.99999%以上のものが得られると言われている。

又，この方法はこのような高純度の水素を得るにも単一工程のみでよく，装置の運転条件によって変化しない所に特徴がある。

水素がパラジウム膜を透過する原理は，現在次の如き機構によって行なわれていると考えられている。

1）水素分子がパラジウム膜に吸着する。

2）吸着分子が吸着したまま水素原子に解離する。（解離吸着）

3）水素原子が陽子と電子に電離して電子を金属格子に与える。（電離）

4）陽子の状態でパラジウム膜の原料側から反対側へ拡散する。（濃度拡散）

5）反対側で陽子が金属格子から電子を受容して原子（吸着状態）となる。

6）吸着水素原子2原子が会合して吸着水素原子となる。

7）パラジウム膜面から脱着する。

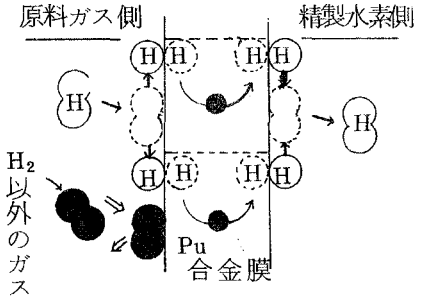


図3－7　Pd合金膜における水素拡散の原理

このように解離吸着して陽子状態になり得る水素のみがパラジウム膜を拡散透過し，他の元素（不純物）は，このような状態になり得ないので，パラジウム膜拡散法によって得られる水素は高純度になる。

透過速度はパラジウム合金膜の種類，厚さ，拡散透過する温度，原料ガス

側水素分圧，製品水素圧力などにより影響を受け，膜厚が薄く，温度が高く，原料水素分圧と製品水素圧力の差が大きい程大きくなる。

又，純パラジウムは常温で自己容積の約500倍の水素を吸収し，いわゆるβ相を形成し，自己容積を10％増加する。これは水素がパラジウムと反応して水素化パラジウムを生成するからであり，温度が300°C以上になるとこのβ相は消滅する。このβ相は脆弱で機械的強度が低く，伸び率は零に近く，又金属表面に小じわや割れを生ずる。

水素雰囲気中で加熱，冷却を繰返すとβ相の生成消滅が繰返され図3－8に示す如く3回位で変形し始め，20回に至れば完全に変形してしまう。この点を改良したのがPd－Ag系合金膜（権利者 Atlantic Ref. Co.）とPd＋Ib族＋Ⅷ族合金（権利者日本純水素㈱）であり，この合金を使用した場合は280回の繰返し実験にも耐え，実用化が可能となった。

加熱冷却サイクル回数	純パラジウム	Pd-Ag-Au-Ru 合金
0		
3		
20		
50		
90		
130		
170		
230		
280		

図3－8　実用Pd合金と純Pdとの加熱，冷却サイクル
（水素中400°C ⇆常温）変化比較

しかしながら，Pd－合金膜の有害物質には硫黄化合物，不飽和炭化水素ハロゲン化物，水銀などがあり，これらを原料から除去する必要がある。その理由は，

① 硫黄化合物

高温でPdSを生成し，金属構造が崩壊する。極微量の硫化物による透過量低下の場合は空気処理により再生可能

② 不飽和炭化水素

不飽和物は膜表面に化学吸着し，膜表面を汚染し，水素の透過速度を低下させる。再生は400°C以上の空気処理活性化操作により可能

③ ハロゲン化物

透過器構成材料のFeと反応し$FeCl_3$（B.P315°C）を形成し，膜表面に沈着し，水素吸着を減少させる。この場合は塩酸で洗浄後生成塩化鉄を系外に出す。

④ 水 銀

パラジウム合金とアマルガムを作り永久被毒を生ずる。水銀は完全に除去する必要がある。

次に水素拡散が行なわれる透過セルについて述べる。

透過セルはパラジウム合金膜を内蔵しているがこのセルの透過温度は通常370～440°C位である。合金膜は現在0.1㎜～0.06㎜程度のものが実用化されており，又実用圧力は20kg/cm² 以下とされている。

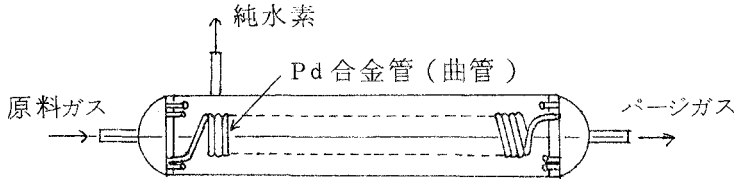
現在実用化されているセル型式は次の種類がある。

i ）管形式　　直管式　Bishop社，曲管式　Engehard社

ii ）板形式　　波板式　日本純水素㈱

図3－9　透過装置基本体（小径直管方式）

図3－10　透過装置基本体（コイル状曲管方式）



実際の工業的水素精製にはこれら透過セルをその要求される水素能力に応じて並列又は直列に並べ，これに原料ガス予熱器を組み合わせて使用する。

現在 5,000NM³/H 程度の容量までが実用化されていると言われている。

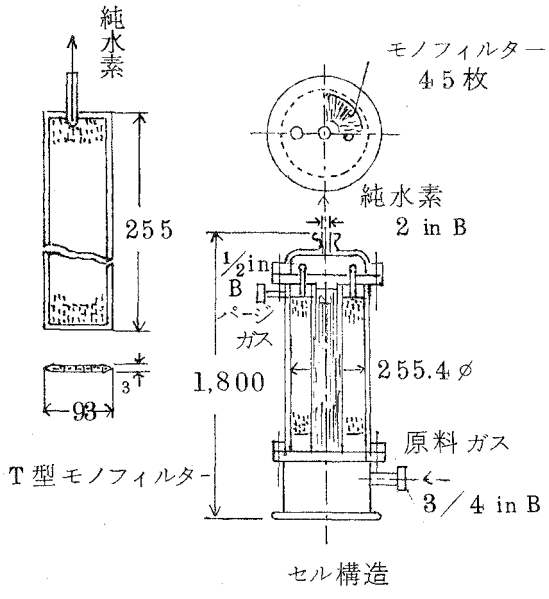


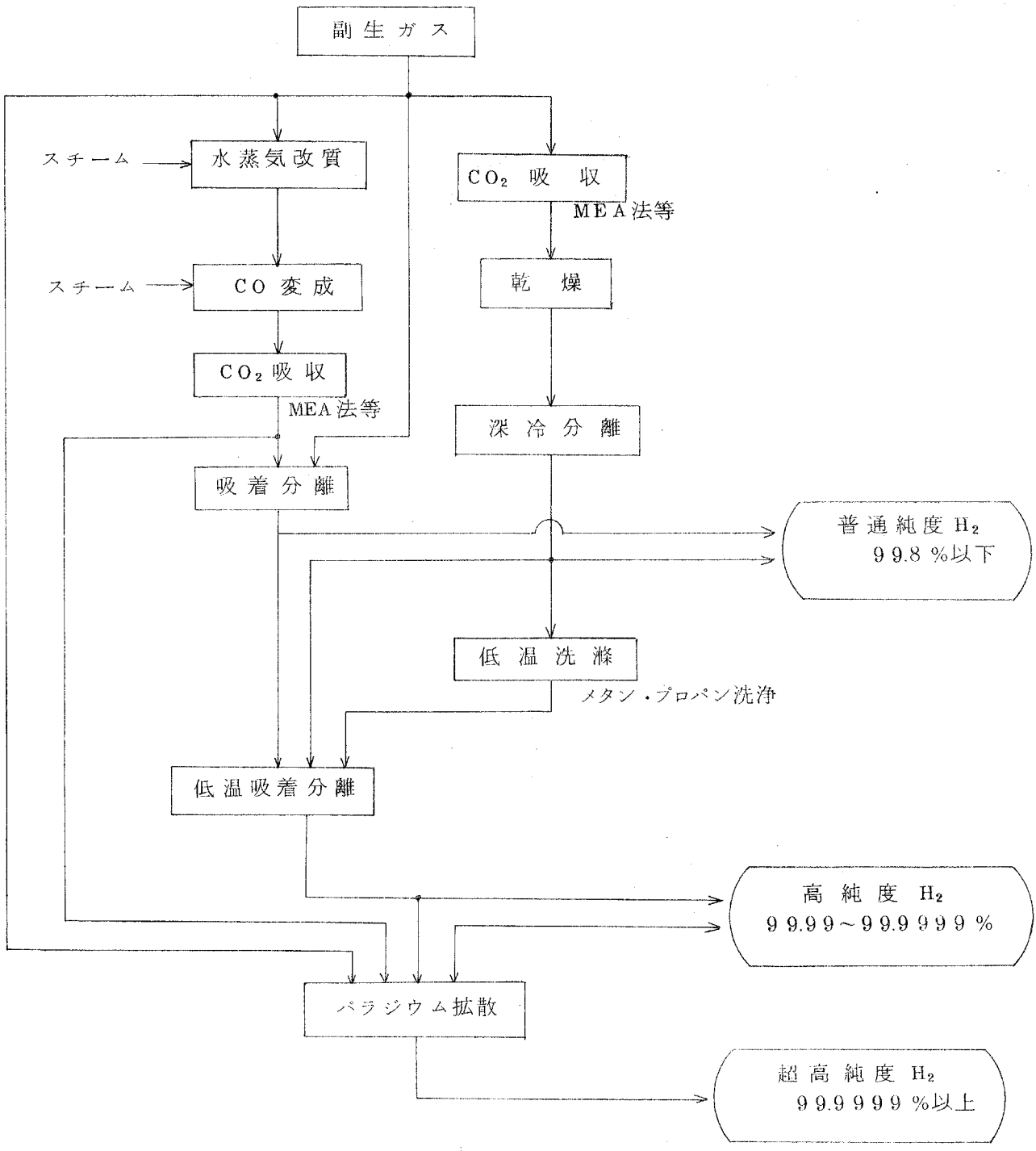
図 3 − 11　波型方式セル構造（大型装置）

3－3　気体水素利用のための精製

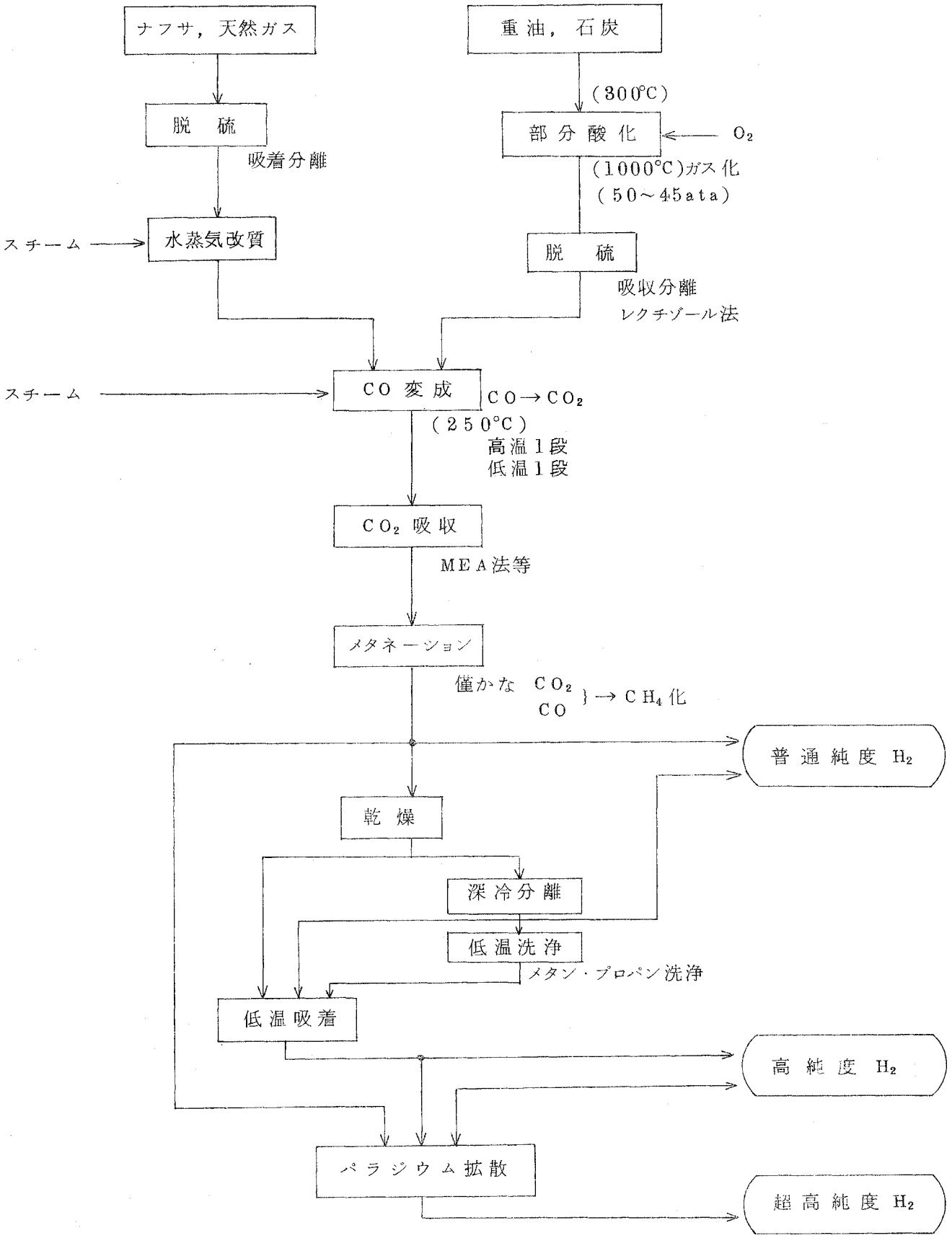
大規模なH_2精製プロセスを模式的に示す。

之等は何れも前述の精製法の適当な組合せによって構成されている。

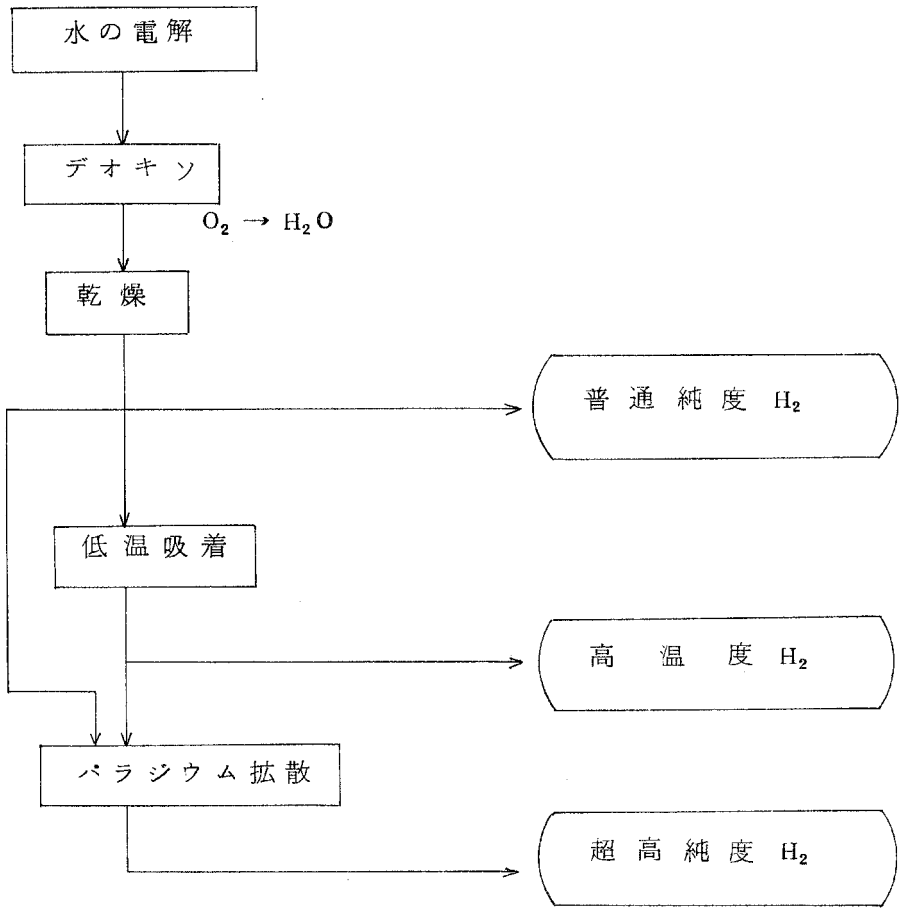
3－3－1　各種化学工業の副生ガスを原料とする方法



3－3－2　石油・石炭・天然ガスを原料とする方法



3－3－3　水の電解法


水の電解
デオキソ
$O_2 \rightarrow H_2O$
乾燥
普通純度 H_2
低温吸着
高温度 H_2
パラジウム拡散
超高純度 H_2

3－4 水素液化のための精製

米国 Air Products & Chemicals 社に於る 35 ton／day の H_2 液化製造連続運転の結果からすれば，液化機に供給される H_2 ガスの純度は 99.9999 %程度（1 ppm の不純物）必要である。

前節に述べた高純度 H_2 精製法がそのまま利用出来るが，吸着剤の再生を入念に行ない且つその頻度を増して常に高純度 H_2 が確保されるように注意せねばならない。

液体 H_2 中に固体酸素或は固体 CO が蓄積されると爆発の危険がある為，不純物の中味にも注意を払わねばならない。吸着剤として活性炭を使用するのはよいが，モレキュラーシーブス等では飽和吸着に近づくと窒素によって既に吸着された酸素が追い出されるので，この場合の吸着剤としては適当でない。

低温吸着が効率よく行なわれる為のキイポイントは，吸着剤の再生に際して，加熱が終ってから不純ガスを完全に追い出すことである。

従って吸着塔の構成にも配管の袋小路を作らないようにせねばならない。

3－5 現状技術と将来

今まで述べて来た H_2 精製法は殆ど既に確立された技術である。唯 MH に対して如何なる不純物がどんな障害を齎すかと云うことについてまだ未知の点が多いと思われるので，これについての研究が今後十分に行なわれる必要がある。それに応ずる H_2 ガスの精製自体は恐らく問題ないであろうと考える。

H_2 精製法は確立されているといっても，日本ではまだ実績がないものも多いので，これを実現するに当っては相当な努力が必要と思われる。然し吾が国の潜在能力からして，勿論不可能と云うことではない。

常温以上の H_2 精製技術は吾が国でも比較的経験を持っているが，大量の H_2 連続液化のために長期間に亘って大量の H_2 ガスを高純度まで精製することは全く経験がないので低温技術とのかかわり合いのもとに今後の開発研究が望まれる。恐らく最も問題になるのは再生の度に温度レベルを急変せしめねばならない吸着器の総合的な熱収支を如何に経済的に行い得るかと云うあたりであろう。又 H_2 圧縮機からの油の混入を如何に除去するか等隠れた問題が出て来るものと思われる。

更に CO 変成の触媒に対する硫黄化合物の毒作用の問題から考えて，触媒毒の少い触媒の開発も今後の重要課題であろう。

§4　貯蔵

4—1　概要

エネルギー媒体としての水素は，主としてガス状で製造されるものと推定出来る。これらの大量の水素ガスは何らかの形で貯蔵する必要がある。この貯蔵出来るという特質こそ二次エネルギーとしての水素エネルギーシステムの大きな特徴である。即ち従来の二次エネルギーとしての電力は容易には貯蔵が出来ない。従って消費電力の負荷変動に対する安定供給の為に予備，待機設備を必要としている。この点，エネルギー媒体としての水素は貯蔵が可能であり，効率的な設備投資を可能とし，効率的な設備の運転を可能にする。この意味で水素エネルギーシステムに於る貯蔵の問題は重要な課題である。

貯蔵の形態としては常圧，高圧の水素ガス，液体水素，金属水素化物，再合成したアンモニア，メタノール等の化学物質等がある。たゞし貯蔵は輸送の問題と不可分の問題であり，この点をも考慮しながら貯蔵形態として高圧水素，液体水素（固体水素も含める）及び金属水素化物について以下の各節で検討しよう。

4—2　気体水素の貯蔵

水素の貯蔵は高圧ガスとして球型タンクなどに貯蔵するのが一般的である。小規模貯蔵としては，現在主として150気圧に圧縮した高圧ガスで行い，貯蔵単位としては10Nm^3／本程度である。しかしながら高圧水素のボンベ等への充塡作業等の取扱いは危険を伴い，より容易な貯蔵形態に移行する事が必要と考えられる。大量貯蔵の一つの方法として天然ガスと同様な方法の一つとして適当な地質の所を選んで地下に貯蔵する事が考えられる。即ち，石油やガスの採掘井戸，鉱石をほり出した抗道等を地下貯蔵用に使用する。たゞ水素分子は小さく上層の岩盤をとおってリークする可能性が大きいので，充分注意する必要がある。このような成功例としては，次のような例がある。

1. ガス：50％ H_2，容量：13 billion ft^3，所在地　パリ近郊，Beynes
2. ガス：He　　，容量：30 billion ft^3，所在地　Texas, Amarillo

水素用圧縮機としては，一般的には次のような形式がある。

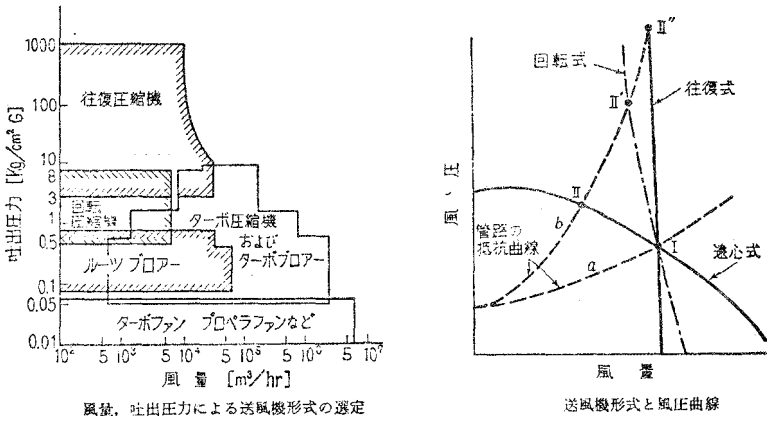
1. 往復動式コンプレッサー

2. 軸流式又は遠心流式タービン．コンプレッサー

3. 回転式（スクリュー，ルーフ．偏心，可動翼型）コンプレッサー

これらのコンプレッサーには，それぞれの方式によって処理容量，圧縮比圧力範囲に制約がある。これについては図4－1にその状況を示した。

図4—1　（化学工学便覧）



a　　b

100万都市の1日当りの水素ガス需要量は2020年目標で民生及び工業用燃料としてすべて水素ガスに転換されるものとすると，その量は実に3610万Nm³/day（154万Nm³/h）に達する。現在の水素圧縮機の処理能力は，150Kg/cm²で5万Nm³/h（NH_3合成用）があるが，球型ガスタンクの設計圧力限界を20Kg/cm²とするとこの程度の圧力範囲では，図4—1でみた場合タービン式コンプレッサーが10～15万Nm³/h程度の処理能力がある事が判る。従って，タービン．コンプレッサーを10台～15台程度準備すれば上記の約150万Nm³/hの水素ガスを処理する事が出来るといえよう。但し，こゝでは圧縮機の寿命，信頼性等については不明である。水素ガス圧縮機の実績の一例を表4—1に示した。

表 4 − 1　水素ガス圧縮機実績例

型　式	動　力 KW	容　量 Nm^3 ／h	圧　力 kg/cm^2	回転数 rqm	台数	製作所	備　考
竪　形 2 列 3 筒 3 段	90	450	11／250	400	2	1969	
〃　1 列 1 筒 1 段	15	900	135／150	290	1	〃	
半星形 4 筒 2 段	180	1,260	9.8	585	1	〃	
竪　形 1 列 1 筒 1 段	26	1,050	24／33.5	450	2	1970	
対向形 2 列 2 筒 2 段	150	1,000	9.9	557	1	〃	
竪　形 1 列 1 筒 1 段	22	800	8.0／9.9	400	1	〃	
	45	2,500	45／60	450	2	〃	
対向形 4 列 4 筒 3 段	270	1,200	60	500	2	〃	
〃　2 列 2 筒 1 段	230	7,900	21／39.8	415	1	1971	
〃	230	1,900	30.4／39.8	415	1	〃	
対向形 2 列 2 筒 1 段	270	11,970	19.5／28.9	415	2	〃	無給油式
〃	140	4,330	26.5／45	585	1	〃	
対向形 2 列 2 筒 1 段	180	8,000	25.9／39.7	500	2	〃	無給油式
竪　形 1 列 1 筒 1 段	60	1,530	23.5／43	450	4	〃	〃
対向形 4 列 4 筒 3 段	500	2,700	30	490	2	〃	〃
竪　形 2 列 3 筒 3 段	37	100	45	400	1	〃	〃
対向形 4 列 4 筒 2 段	1,640	20,800	15.2／71.7	370	2	〃	
対向形 2 列 2 筒 2 段	160	2,225	16.5／62.2	490	2	1972	
竪　形 1 列 1 筒 1 段	45	990	11／24	420	2	〃	無給油式
横　形 1 筒 1 段	250	29,150	204／233	325	2	〃	
対向形 2 列 2 筒 1 段	230	9,000	18／24	490	1	1973	無給油式
〃	250	3,180	8／37	420	2	〃	〃
竪　形 1 列 1 筒 1 段	30	966	25.5／39	250	2	〃	〃
〃	22	1,800	25.5／29.5	400	2	〃	〃
〃	45	100	150	500	1	〃	
対向形 4 列 4 筒 3 段	タービン 900	43,000	1.8／36.2	550	1	〃	無給油式
対向形 2 列 2 筒 1 段	200	3,240～	0.37／3.53	505	2	1974	
対向形 2 列 2 筒 2 段	1,450	1段 21,250 2段 26,930	17.92／66	350	2	〃	
〃	1,450	〃	〃	350	1	〃	無給油方式
対向形 2 列 2 筒 1 段	115	2,838	11.5／27	500	4	〃	〃
横　形 1 列 1 筒 1 段	75	4,500	11.5／15.5	300	2	〃	〃
対向形 2 列 2 筒複合	220	1,380 9,605	21／37.6 28.2／37.6	420	2	〃	〃
対向形 2 列 2 筒 2 段	620	8,450	14.9／71.2	325	3	〃	
〃	800	11,000	14.9／71.2	390	3	〃	
竪　形 1 列 1 筒 1 段	60	1,530	23.5／43	450	2	〃	無給油式

圧縮機の所要馬力S及びコスト等は次式で与えられている。

(1) $$SHP = \frac{HPad}{\eta ad} = \frac{2.19}{\eta ad} \frac{z \cdot \gamma}{\gamma - 1} P.V \left\{ \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{\gamma - 1}{z \cdot \gamma}} - 1 \right\}$$

HP　：断熱理論馬力

ηad：断熱効率

z　：圧縮段数

γ　：断熱指数

P_1　：吸込圧力

P_2　：吐出圧力

V　：吸込状態に換算した吐出風量

断熱効率：ηad の値は，

往復動式で　小型　40～70％

中型　70～85％

大型　80～90％

タービン式で（遠心型　）　55～75％

回転式　（ルーツ型）　60～80％

(2) 動力費 = 0.7355×Ps
（KW）

(3) 圧縮機コスト =（物価指数／S41年基準）×2.153×10^4.$(KW)^{0.957}$

(4) 年間経費 = 償却費 + 動力費 + 保守費

各型式のコンプレッサー共大きな変更なしで水素用として基本的には使用出来るが，特に水素ガスに対する各型式の特徴としては，往復動式の場合風量が少い為単位時間当りのエネルギー輸送量は小さくなる。ターボ・コンプレッサーの場合の制限要因は，特に軽い水素の場合圧縮比がとれない事である。回転式の場合には例えばスクリュー・コンプレッサーの場合本来無潤滑のものであのが圧縮比は2程度しかとれない。圧縮比を高くとる為には，油を必要とする。油は潤滑油というよりむしろシーラントとして使われ，圧縮比は30程にも上げる事が出来，送風量

も大巾に向上させる事が出来た。この事から，シーラントの工夫によって，大容量，高圧縮比の水素用新型コンプレッサーを得る事も可能となろう。

高圧水素球型タンクのコスト計算式は表4—2で表わされこれを参考にする事が出来る。水素ガスタンクでの貯蔵は，圧力はいわゆるボンベ充塡のような150～200気圧はのぞめず，充塡圧力は20気圧程度であり，単位体積当りのエネルギー貯蔵量は，他の液体水素や金属水素化物に比べて小さい。（表4—3A，表4—3B参照）又単位エネルギー当りのコストも他のシステムに比べて大きすぎるこの事については，表4—14で比較を行った。この表でみても，高圧水素は大規模貯蔵システムとしては，一般的なものにはならないと考えられるが，輸送及び末端利用のサブシステムとしての小規模貯蔵システムとして可能性があり得る。但し，末端利用システム共々全般的な技術開発が必要である。

4—3　液体水素の貯蔵

水素は特に欧米では宇宙用として液化し貯蔵，輸送する事が一般的技術になって来ている。しかしながらエネルギー媒体としての大量の水素を取扱い且つ，一般民生用としての供給をする段階では，経済性はもちろんだが，たぶん取扱上の安全性と法規の問題が重要になると考えられる。この点については，水素エネルギー・システム全体の安全性については後節で別に議論しているのでこれにゆずる。

こゝでは，現有技術によって100万人都市に必要な水素ガス量を，実際に液化，貯蔵し得るがどうかを検討してみよう。さて3.610万Nm^3/hの水素ガスを液化処理する為には液化能力は，液体水素で1815 m^3/h = 128.5 ton/h = 3,030 ton/day 必要になる。

現在の世界最大級の水素液化機は液化能力60 ton/day であり，大型水素液化機の開発が必要である事を如実に示している。なお表4—4に世界に於る大型水素液化機の一覧表をあげた。又，大型水素液化機のシステム及びフロー・シートの一例を図4—2—(A)及び図4—2—(B)に示した。

表 4 － 2

(1) $D = \left(\frac{6V}{\pi}\right)^{1/3}$

(2) $t = \frac{PD}{100f\eta - P} + C$

- P：常用圧力（Kg／cm²G）
- D：内径（mm）
- C：くされ代（mm）
- f：材料強度（Kg／mm²）（引張強さ）
- η：接手効率

(3) $T = \pi D^2 \times t \times \rho \times 10^{-9}$

- T：総重量（ton）
- ρ：鉄比重 7.86（ton／m³）

(4) $C_{mat} = T \times @C$

- C_{mat}：材料コスト（yen）
- @C：単価（yen／ton）

(5) $C'_{total} = (2.26 \sim 2.59) \times C_{mat}$

- C'_{total}：全建設費（yen）

(6) 一般附属品とは別に特に高圧水素についての保守．安全系統の必要性の検討

(7) $C_{total} = C'_{total}$＋計装費

(8) 年間経費＝償却費＋保守費

表４－３－Ａ　単位重量及び体積当りの水素量

水素・水素化合物		融点（℃）	沸点（℃）	水素含量（wt%）	密度 g/cm³	密度 10^{22} H原子/cm³	有効水素量 g当量/g	有効水素量 g当量/cm³	燃焼熱 cal/g	燃焼熱 cal/cm³	P_{H_2}＝1 atm の温度（℃）
水素	常圧 1atm	-259.1	-252.8	100	8.99×10^{-5}	5.4×10^{-3}	0.992	8.92×10^{-5}	28,670	3	-252.8
	高圧 150atm				1.349×10^{-2}	0.81	0.992	1.338×10^{-2}	28,670	387	
	液体				(-252.8℃) 0.0709	4.2	0.992	0.070	28,670	2.033	
	固体				0.0808	4.8	0.992	0.080	28,670	2,320	
水素化物	TiH_2			4.04	3.78	9.1	0.040	0.151	1,150	4,270	650
	MgH_2			7.66	1.45	6.6	0.076	0.110	2,180	3,160	284
	LaH_3			1.96	5.26	6.2	0.019	0.100	549	2,888	200
	$LaNi_5H_7$			1.60	7.95	7.6	0.016	0.127	462	3,676	<25
アンモニア	気体	-77.7	-33.4	17.8	0.771×10^{-3}	8.2×10^{-3}	0.177	0.136×10^{-3}	4,440	3	
	液体				(-79℃) 0.817	8.7	0.177	0.145	4,440	3,630	
メタノール		-97.8	64.6	12.6	0.7928	6.0	0.125	0.099	4,760	3,780	

表４－３－Ｂ　一定水素燃料を貯蔵するとしての容量及び重量比較

	重量 kg	容積 kg
H_2 ガスボンベ（2000psi）	1045	30
H_2 液体	161	4.6
Mg ハイドライド（40%空隙率）	316	4.9

表 4 — 4

世界における大型水素液化機の現状　　*) アメリカ空軍所有

Company	Air Products and Chemicals (U. S. A.)	L' Air Liquide (FRANCE)	L' Air Liquide (FRANCE)	Air Products*) and Chemicals (U. S. A.)	Union Carbide, Linde (U. S. A.)
Location	New Orleans, Louisiana	Le Blanc-Mesuil Seine	France Marais Nord	West Palm Beach, Florida	Sacramento California
Plant Capacity (ton/day)	30	0.468	0.84	30	60
Year on Stream	1965	1964	1966	1958	—
Source of H_2	Natural Gas Steam Reforming	Cracked NH_2 & Cylinders	Coke Oven Gas	Partial Oxidations of Fuel Oil, Natural gas	Natural Gas Steam Reforming
Purification methods	Partial Condensations Adsorption	Low Temperature Adsorption	Low & High Temperature Adsoption	Adsorption	MEA Scrubbing Absorption & Adsorption
Compressors	Reciprocating (N_2 & H_2)	Reciprocating	Reciprocating	Reciprocating (N_2 & H_2)	N_2-Centrifugal N_2-Reciprocating H_2-Reciprocating
Refrigeration	Reciprocating Expander (N_2 & H_2)	J-T Expansion (H_2) LN_2 from Outside	Turbo Expander (H_2) Reciprocating Exapnder (H_2 & N_2)	Turbo Expander (H_2) Reciprocating Expander (N_2)	Turbo Expander & J-T Expansion
Ortho-Para Conversion	Temperature Levels 7 Catalyst, A. PAACHI	Temperature Levels 2 Catalyst, Iron Oxide	Temperature Levels 7 Catalyst, Iron Oxide	Temperature Levels 5 Catalyst, Iron Oxide	Houdri Catalyst to 95% Para
Cold Box Insulation	Proprietary and Evacuated Perlite	Vacuum	Perlite and Vacuum	Rockwool & Perlite	Perlite and H_2 Gas
Storage Capacity (m^3)	3780	10	50	75	3000
Distribution	Rail Roadcars Barges Trailers	Trailers	Trailers	Trailers	Trailers and Tankcar

図 4 — 2 — A

水素液化及び貯蔵装置

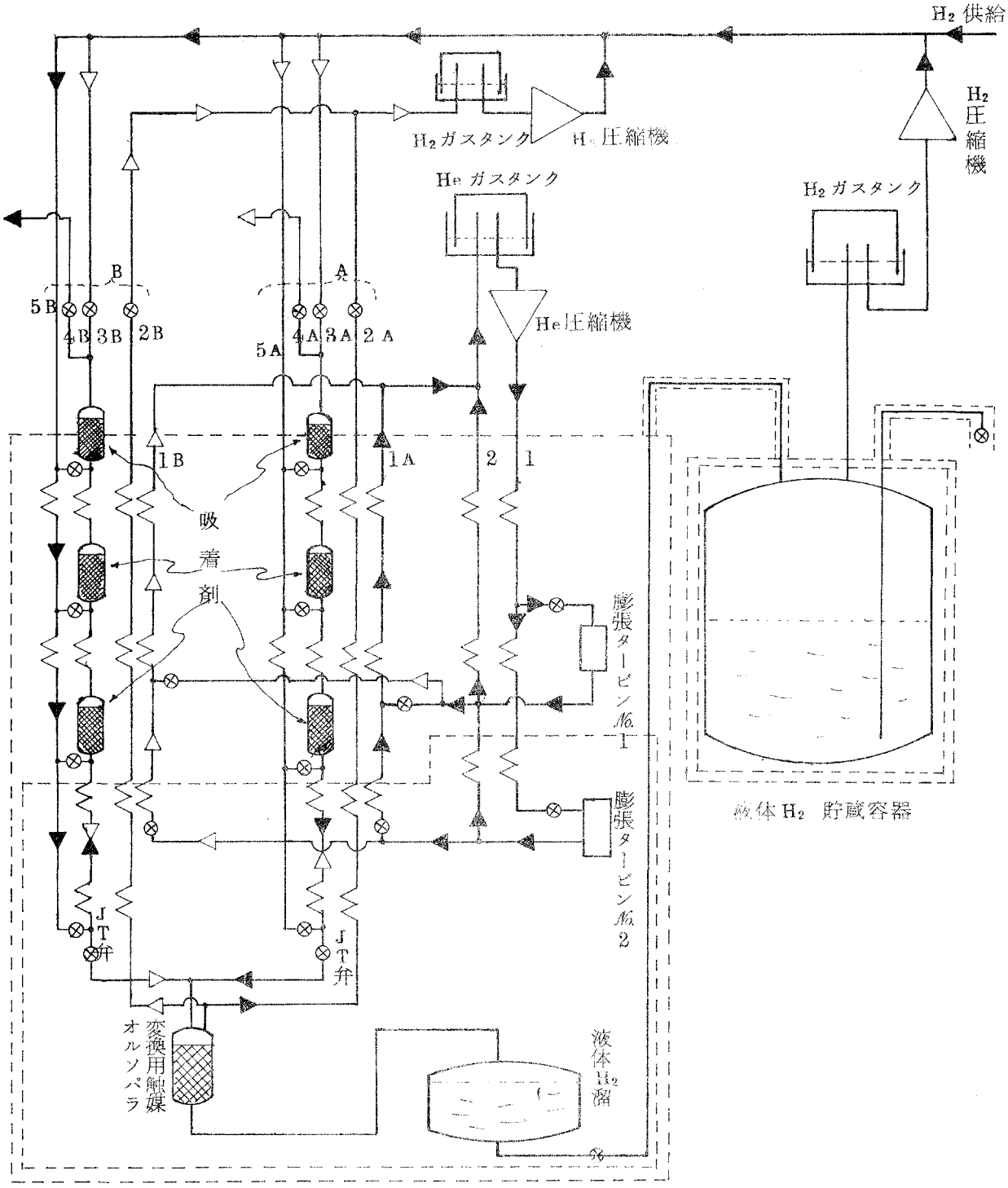
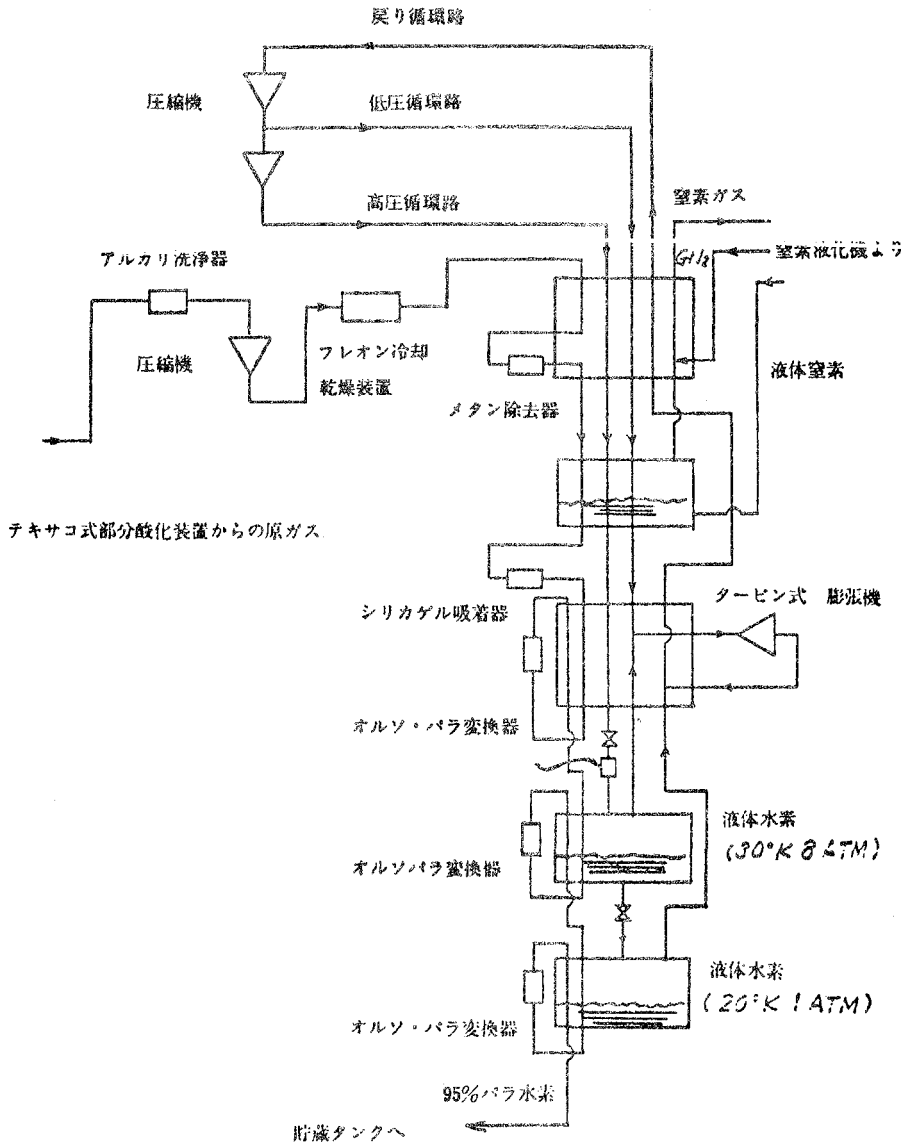


図 4 — 2 B

30 ton/日 水素液化機本体フローシート



水素液化装置の運転コスト等については，以下の項目を考慮する必要がある。

所要液化能力　VS　イニシャル・コスト

所要液化能力　VS　消費動力

運転コスト＝償却費＋動力費＋保守費

オルソ―パラ―触媒変換効率

現状の液化装置のイニシャル・コスト及び消費動力については，図4－3，図4－4を参考にすることが出来る。

さて，こうして液化して製造した液体水素の貯蔵は，単位容積当りエネルギー貯蔵量の点で最良であるとされている。この単位容積当りの数字については，図4―5で比較する事が出来る。エネルギー貯蔵の上での液体水素の利点は，液体水素を減圧し，液体水素と固体水素との50％混合の雪どけ状態にする事により,10％以上空間を節約する事が出来，更にエネルギー貯蔵効率を向上し得る事である。液体水素貯蔵の上での液体水素である為の制約は，筆頭にかゝげた安全性の問題が主なものでありその他LNGの場合と基本的には変更はないが，あげるとすれば，タンク構造，断熱方式にあろう。

タンク構造はおゝむね球型二重殻金属製が多く，断熱方式としては真空断熱，多層断熱，真空粉末断熱方式がとられている。実績規模では一般に容量の大きいものほど断熱性能がよく，3000 m^3程度の容量のものでその蒸発量は0.1％／day ～0.037％／day.であり，小型のものでは0.5～1.0％／day程度である。液体水素の貯蔵技術の将来に関して議論する場合LNG，LOX，LN_2の貯蔵技術及び実績を前提とする必要がある。液化ガス貯蔵タンクの容量実績では45000m^3～60,000m^3であるが，最大可能容量としてLNG貯蔵の例を参考にしてみよう。

図4－8　液化装置のコスト

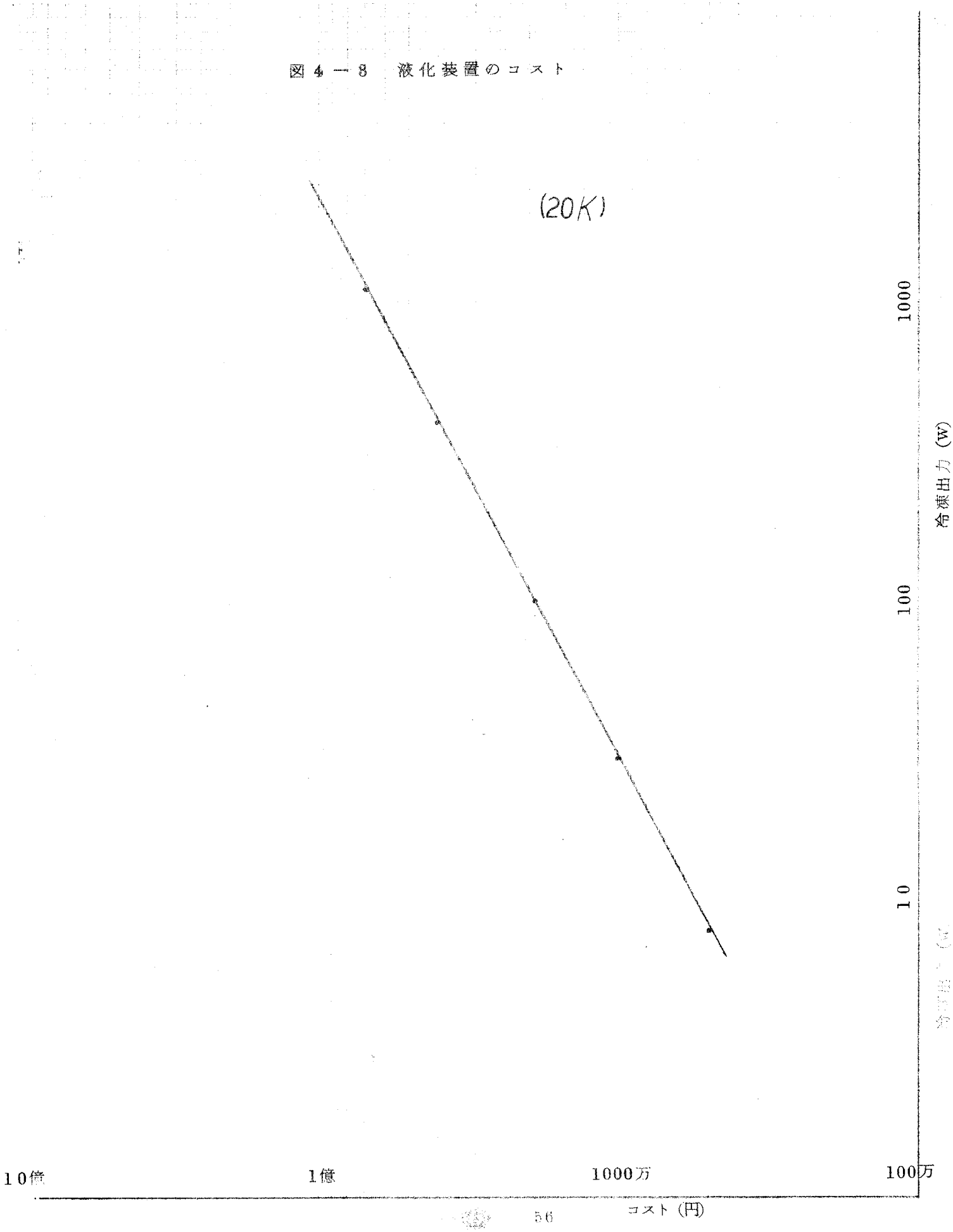


図 4 − 4

Refrigeration Capacity vs. Power Requirements
for 4.5, 20, and 78K Refrigerators

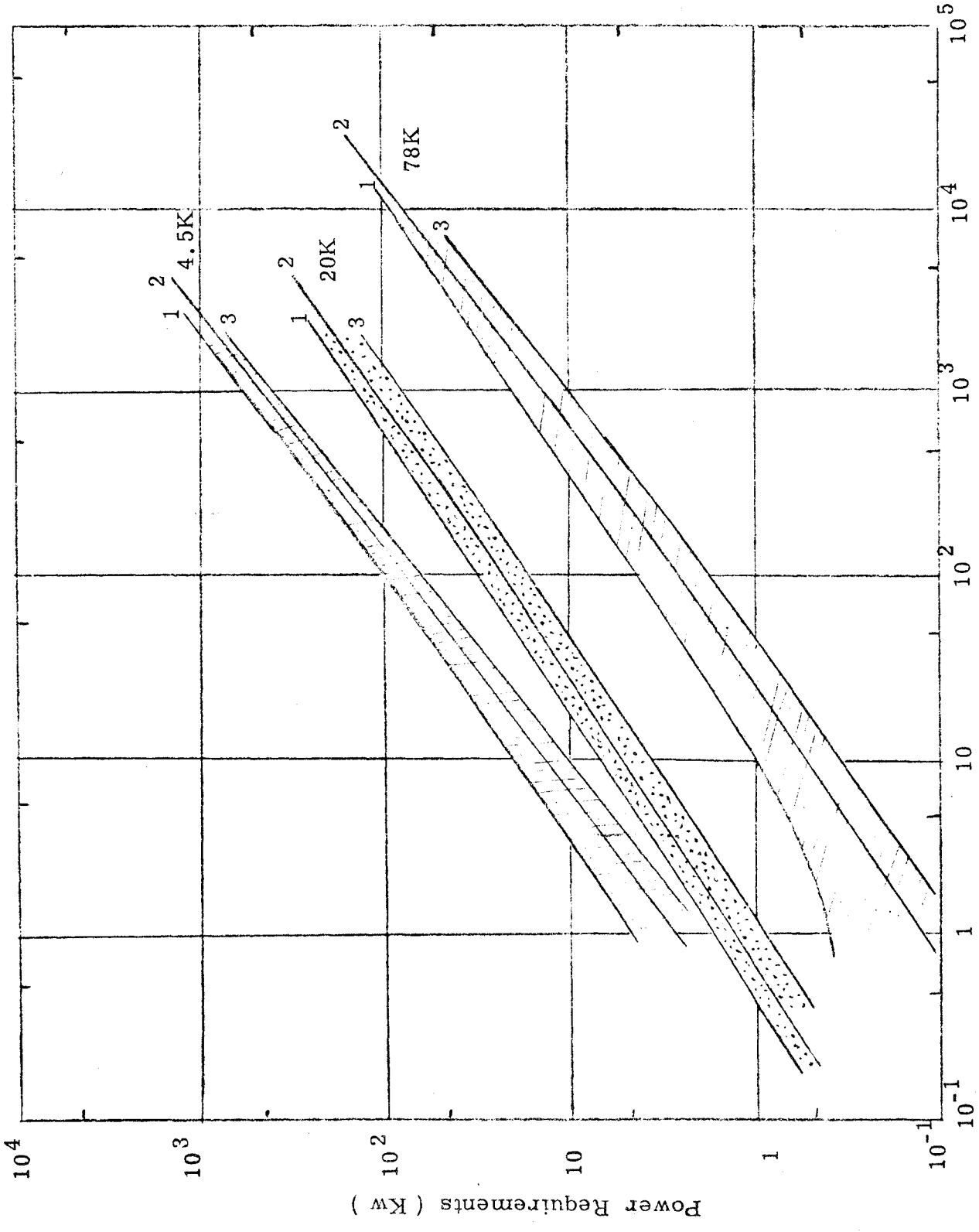
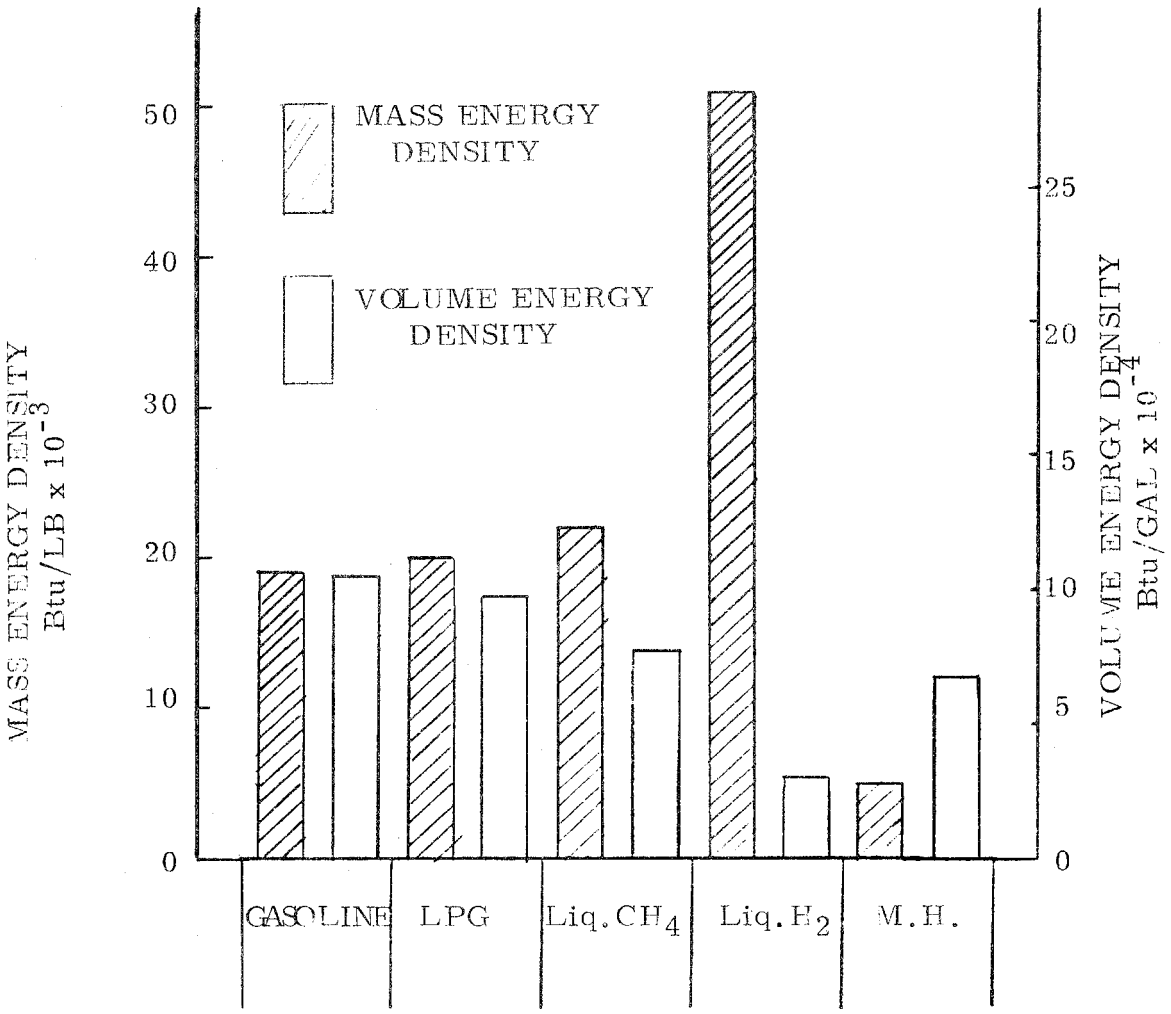


図4－5 単位エネルギー当りの重量、体積



重　量

- ガソリンタンク
- 液体水素容器
- 鉄・チタン水素化物
- 鉄・チタン－マグネシウム・ニッケル水素化物
- 140atm ボンベ

体　積

- ガソリンタンク
- 鉄・チタン－マグネシウム・ニッケル水素化物
- 鉄・チタン水素化物
- 液体水素容器
- 140 atm ボンベ

（単位エネルギー当り）

表4—5

構造	最大可能容量	所要面積	建設期間	特徴	実績数量
地上金属製二重殻タンク	20万m^3	大	短	高価安定	1位
地中凍結式 タンク	10	小	長	大容量 不安定：安価	2位
PS・コンクリート製タンク	40	大	長	〃	3位
メンブレン式	20	大	短	対震策未確定 安価	2位

又 LNG, LN_2, LOX用の低温タンク実績例を表4—6及び7に示した。

断熱方式による違いはあるが液体水素貯蔵の場合でも先にも述べた通り，現状技術で十分大容量の貯蔵タンクを建設する事が可能である事が判ろう。現実には1815 m^3/h × 24 = 43.500 m^3/day もの大容量の液体水素を貯蔵する設備を考慮する場合，Peak shaving 的な需要量については考えていない。世界最大の液体水素タンクは，米国ネバタ州に建設されているもので3400 m^3の容量をもっている。世界に於る液体水素貯蔵槽の例を表4—8に示した。これに対し，国内では，わずかに3 m^3のタンクが試作されたにすぎず，未だしの感があるが，LOX, LN_2, LNG などでの球型タンク，平底球面屋根二重殻式タンクでは，60,000 m^3の実績があり容量の点でのこの分野での技術レベルは，現状で十分であるが，上記の容量3400 m^3のタンクで，実に0.03 %/day の蒸発率におさえる断熱技術の点ではこれからの工業的開発が必要と思はれる。

4—4 金属水素化物の製造と貯蔵

4—4—1 概要

水素は活性の強い気体であるため，多くの元素と反応して水素化物，水素化合物を形成する。水素よりも電気陰性度の低い元素との反応生成物を水素化物，高い元素とのそれを水素化合物と称する。従って水素化合物というのは CH_4, NH_3, H_2O 等であり，ここではこれ以上ふれないで水素化物を対象とする。

水素化物については，金属と水素の結合の性質から次のような分類がなされている。

表4－6　世界における低温液化ガス貯槽

Liquefied gas	Capacity of storage tank (m^3)		
	U.S.A.	Europe	Japan
LEG	2000～3000 (sphere & doom roof)		
LNG	max 45000 (doom roof)		
LOX LN_2	max 3000 (sphere & doom roof)		
LH_2	max 4000	max 50	max 0.3
LHe	max 120	——	max 0.3

表4－7　低温タンク実績例

球形二重殻式超低温貯蔵タンク

貯蔵物	容量(m³)(内ton)	内径(mm)		設計圧力(kg/cm²G)	設計温度(℃)	材質
液化エチレン	4,015 (2,000)	内槽	19,720	1.0	-104.0	A5083-0
		外槽	21,520			
液体酸素	395 (400)	内槽	9,100	1.5	-183.0	9%Ni
		外槽	10,900			
〃	271 (300)	内槽	8,260	4.0	-183.0	〃
		外槽	10,600			
液化エチレン	2,008 (1,000)	内槽	15,600	1.0	-104.0	SUS27
		外槽	17,400			
〃	3,963 (2,000)	内槽	19,590	1.5	-104.0	A5083-0
		外槽	21,390			
液体酸素	878 (1,000)	内槽	12,380	1.5	-183.0	〃
		外槽	14,780			
液体窒素	875 (700)	内槽	12,380	1.5	-196.0	〃
		外槽	14,780			
液体酸素	878 (1,000)	内槽	12,380	1.5	-183.0	〃
		外槽	14,780			
液体窒素	875 (700)	内槽	12,880	1.5	-196.0	〃
		外槽	14,780			
液体酸素	1,756 (2,000)	内槽	15,600	1.5	-183.0	〃
		外槽	18,000			
液体窒素	625 (500)	内槽	11,050	2.0	-196.0	〃
		外槽	13,450			
液体酸素	271 (300)	内槽	8,300	4.0	-183.0	〃
		外槽	10,700			

表 4 — 7　平底球面屋根二重殻式超低温貯蔵タンク

貯蔵物	容量(kℓ) (内ton)	内径×高さ (mm)	設計圧力 (kg/cm²G)	設計温度 (℃)	材質
液体酸素	180 (200)	内槽6,740×5,100 外槽9,140×6,840	0.1	-183.0	A5083-0
〃	1,140 (1,300)	内槽11,150×11,700 外槽13,550×13,785	0.1	-183.0	9%Ni
液体窒素	300 (240)	内槽7,260×7,010 外槽9,480×9,092	0.1	-196.0	〃
液体酸素	440 (500)	内槽9,200×6,450 外槽11,600×8,478	0.15	-183.0	〃
〃	880 (1,000)	内槽11,150×8,915 外槽13,550×11,000	0.15	-183.0	〃
〃	400 (456)	内槽10,180×4,740 外槽12,580×6,950	0.15	-183.0	A2P7-0
〃	440 (500)	内槽9,200×6,450 外槽11,600×8,478	0.15	-183.0	SUS27
液体窒素	250 (200)	内槽6,950×6,500 外槽9,350×8,084	0.15	-196.0	〃
液体酸素	2,200 (2,500)	内槽14,600×14,200 外槽16,400×16,400	0.15	-183.0	9%Ni
〃	400 (456)	内槽10,180×4,740 外槽12,580×6,950	0.15	-183.0	A5083-0
〃	880 (1,000)	内槽11,150×8,915 外槽13,550×11,000	0.15	-183.0	9%Ni
〃	880 (1,000)	内槽11,150×8,915 外槽13,550×11,000	0.15	-183.0	SUS27
液体窒素	880 (700)	内槽11,150×8,915 外槽13,550×11,000	0.15	-196.0	〃
液体酸素	1,144 (1,300)	内槽11,150×11,700 外槽13,550×13,785	0.1	-183.0	〃
LNG	45,000 (21,000)	内槽44,600×28,820 外槽46,400×31,880	0.1	-162.0	9%Ni
〃	45,000 (21,000)	内槽44,600×28,820 外槽46,400×31,880	0.1	-162.0	〃
液体酸素	300 (344)	内槽7,260×7,010 外槽9,680×9,092	0.1	-183.0	A5083-0
液化エチレン	281 (140)	内槽6,910×6,560 外槽8,710×8,257	0.1	-104.0	〃
LNG	35,000 (16,500)	内槽38,800×23,820 外槽41,200×31,700	0.1	-162.0	9%Ni
液化エチレン	4,000 (1,992)	内槽17,360×16,520 外槽19,360×18,560	0.1	-104.0	A5083-0
液体窒素	880 (700)	内槽11,150×9,000 外槽13,550×11,000	0.15	-196.0	〃
液体酸素	702 (800)	内槽11,150×7,300 外槽13,550×9,307	0.1	-183.0	〃
液体窒素	481 (385)	内槽9,200×7,250 外槽11,600×9,300	0.1	-196.0	〃
液体酸素	263 (300)	内槽6,450×4,700 外槽10,550×6,700	0.15	-183.0	〃
液体窒素	250 (200)	内槽7,250×6,000 外槽9,680×7,950	0.15	-196.0	〃
液体酸素	1,750 (2,000)	内槽14,050×11,200 外槽16,450×13,470	0.1	-183.0	〃
液体窒素	1,123 (900)	内槽12,120×9,700 外槽14,520×11,910	0.1	-196.0	〃
液体酸素	3,160 (3,600)	内槽16,960×14,000 外槽19,260×16,264	0.1	-183.0	〃
〃	878 (1,000)	内槽12,120×9,720 外槽14,520×11,853	0.15	-183.0	〃
液体窒素	878 (700)	内槽12,120×9,720 外槽14,520×11,853	0.15	-196.0	〃
液化エチレン	5,247 (2,520)	内槽21,946×21,260 外槽23,165×21,967	0.07	-103.0	〃

表 4 — 7

貯蔵物	容量〔kℓ〕 （内ton	内径×高さ 〔mm〕	設計圧力 〔kg/cm²G〕	設計温度 〔℃〕	材質
液体酸素	1,140 (1,300)	内槽11,150×11,700 外槽13,550×13,785	0.1	-183.0	A5083-0
〃	300 (264)	内槽 7,280× 7,010 外槽 9,680× 9,092	0.1	-183.0	A5083 P-0
液体窒素	250 (200)	内槽 7,280× 6,000 外槽 9,680× 7,960	0.1	-196.0	A5083-0
液化エチレン	8,000 (3,900)	内槽23,370×19,440 外槽25,170×20,950	0.2	-104.0	A5083 P-0
液体酸素	878 (1,000)	内槽11,150× 9,000 外槽13,550×10,980	0.15	-183.0	〃
液体窒素	875 (700)	内槽11,150× 9,000 外槽13,550×10,980	0.15	-196.0	〃
液体酸素	880 (1,000)	内槽11,150× 9,000 外槽13,550×10,980	0.15	-183.0	A5083 Q-0
液体窒素	880 (700)	内槽11,150× 9,000 外槽13,550×10,980	0.15	-196.0	〃
〃	500 (400)	内槽 8,250× 7,500 外槽10,650× 9,470	0.1	-196.0	A5083-0
液体酸素	263 (300)	内槽 8,450× 4,700 外槽10,850× 6,700	0.1	-183.0	〃
液化エチレン	4,000 (1,998)	内槽17,560×17,360 外槽19,360×19,000	0.2	-104.0	〃
液体酸素	440 (500)	内槽 9,210× 7,350 外槽11,610× 9,350	0.1	-183.0	〃
液体窒素	625 (500)	内槽 9,210× 7,350 外槽11,610× 9,350	0.1	-196.0	〃
L N G	45,000 (21,000)	内槽44,600×28,820 外槽46,400×31,876	0.1	-162.0	9%Ni
〃	45,000 (21,000)	内槽44,600×28,820 外槽46,400×31,620	0.12	-162.0	〃
〃	45,000 (21,000)	内槽44,600×28,820 外槽46,400×31,420	0.12	-162.0	A5083-0
〃	45,000 (21,000)	内槽44,600×28,820 外槽46,400×31,875	0.12	-162.0	〃
〃	60,000 (28,000)	内槽51,500×28,820 外槽53,300×32,316	0.12	-162.0	〃
〃	25,000 (11,680)	内槽35,700×24,280 外槽37,700×26,998	0.12	-162.0	〃

コンポジットセグメント式超低温地下貯槽タンク

貯蔵物	容量〔kℓ〕 （内ton	内径×深さ 〔mm〕	設計圧力 〔kg/cm²G〕	設計温度 〔℃〕	インナー 材質
L N G	10,000 (4,680)	30,000×14,150	0.1	-162.0	SUS27
〃	60,000 (28,000)	50,000×32,280	0.1	-162.0	〃
〃	60,000 (28,000)	60,000×23,000	0.12	-162.0	〃
〃	60,000 (28,000)	60,000×23,000	0.12	-162.0	〃
〃	45,000 (21,000)	54,000×21,350	0.12	-162.0	〃

表 4 — 8　　世界における液体水素貯槽

Location	Type	Capacity(m^3)	Inner Wall	Insulation	Boil off (%/day)
Los Alamos Scientific Laboratory, Univ. of California	Double Wall Sphere	200	sus	Evacuated Perlite	0.2
Los Alamos New Mexico	〃	1,900	—	〃	—
USAF LH_2 Plant West Palm Beach Florida	〃	380	—	—	—
L' Air Liquide LH_2 Plant Frais Marais, Nord	—	50	—	Evacuated Perlite	—
Air Products New Orleans Louisiana	—	3,870	—	〃	0.5
Union Carbide Linde Division Sacramento California	—	3,000	—	Super-insulation	0.1

1） イオン結合型水素化物

2） 金属結合型水素化物

3） 共有結合型水素化物

周期律表上の元素がどのような水素化物を形成し，どの化学結合に属するのかを概念的に示したのが図4—6である。（以後，特にことわらない限り1)，2）を総称して金属水素化物とよぶことにする。）これらの水素化物は化学結合の種類によって必ずしも製造方法が適用できる訳ではないが，次のような方法がある。

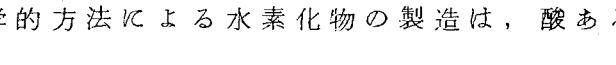
1） 電気化学的方法による製造

2） 酸化物の還元による製造

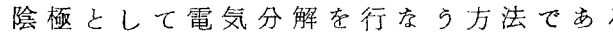
3） 金属と水素ガスとの直接反応による

4—4—2 製 造

電気化学的方法による水素化物の製造は，酸あるいはアルカリ溶液中で試料を陰極として電気分解を行なう方法である。この方法は簡単であるが，適用できうる金属は限定されてしまう。金属水素化物を酸化物の還元によって製造する例として



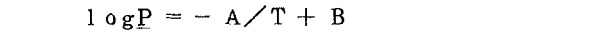
$$CaO + Mg + H_2 \rightarrow CaH_2 + MgO$$



$$TiO_2 + 2CaH_2 \rightarrow 2CaO + TiH_2 + H_2$$

がある。弗化水素酸で金属と反応させてつくる場合もあり，NbH_2はこのようにして作製された。

図4—7は金属水素化物MH_nの水素圧と組成の等温線図を示したものである。一定温度で金属と水素を反応させると，金属中に水素が固溶され，それと共に平衡水素圧は高くなってゆくが，ある組成のところで水素化物が形成され，金属がすべて水素化物に変化するまで水素の平衡圧は一定である。その時点を越えると水素はもはや金属とは反応せず，水素を加えても系の水素圧が高くなるだけである。系を任意の温度に設定すると平衡解離圧Pで金属中に吸蔵された水素を取り出すことができる。平衡解離圧Pは次のように表わされている。



$$\log P = -A/T + B$$

イオン結合 ⟶ 金属結合 ⟶ 共有結合

アルカリ　　アルカリ土類 ⟶ 遷移金属 ⟶ Zn ⟶ ハロゲン族まで

ⅠA族　　ⅡA族　　ⅣA ～ Ⅷ族　　ⅠB ～ ⅢB族

(LiH, NaH)　　(MgH_2, CaH_2)　　(TiH_2, NbH, PdH)　　(CuH, AlH_3)

ⅢA族　　ⅣB族

希土類 ⟶ アクチニド　　(SiH_4, GeH_4)

(LaH_3, UH_3)

図4—6　水素化物と化学結合の関係

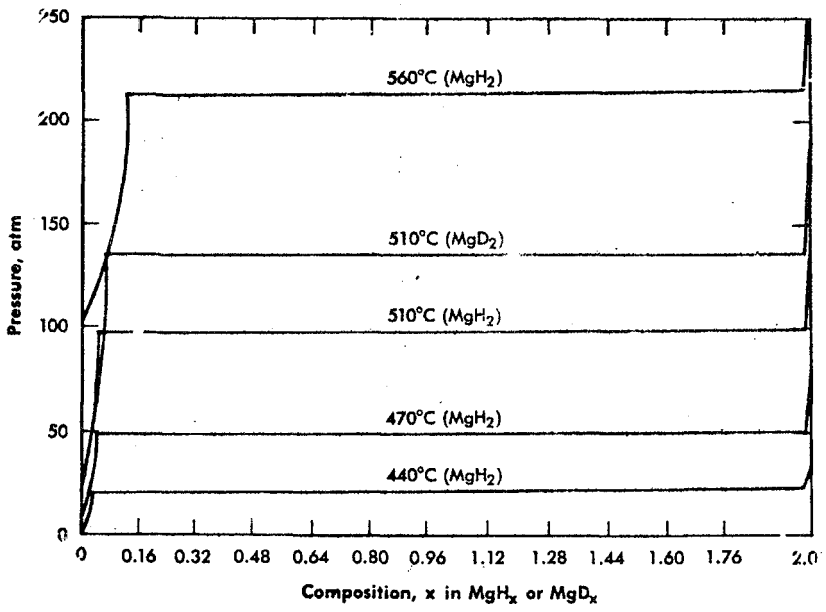


図 4.－7　マグネシウム－水素系の圧力・組成の等温線

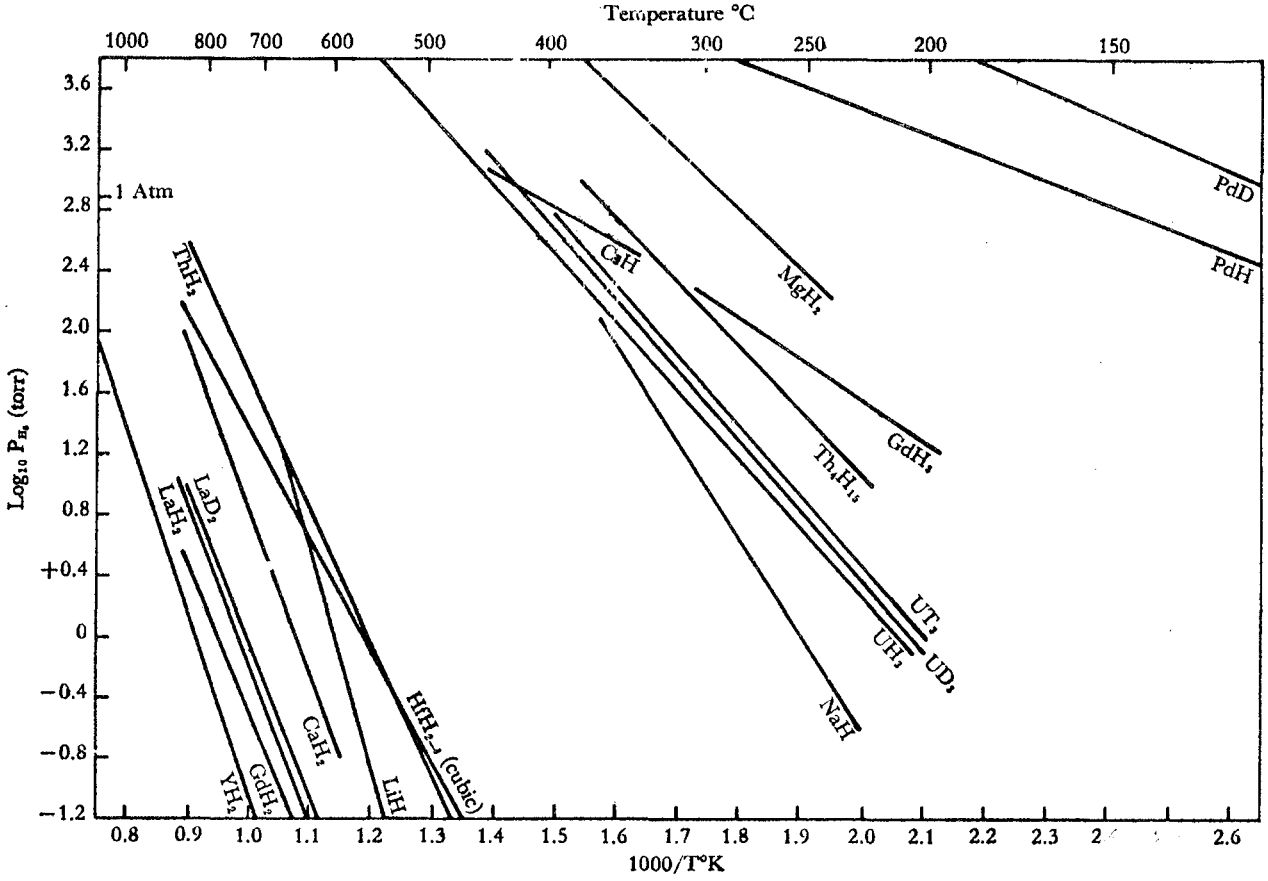


図 4－8　水素化物の平衡圧と温度の関係

図4—8に種々の水素化物についてのこの関係を示す。上記の関係式から水素化物の生成熱を求めることができる。表4—9にいくつかの水素化物についての実験値を示す。金属と水素ガスとの直接反応による水素化物の製造に際して，金属の状態にもよるが，生成熱の大小が重要な因子となっている。水素圧，雰囲気温度を変えた時，時間と共にどのように金属と水素の反応が進んでいくかを示したのが図4—9，図4—10である。Mgのように水素との反応性が低い物質でもNi，Cuなどを添加することにより反応性が高められる例がある。このような触媒作用については，今後の重要な問題の一つである。

4—4—3　貯　蔵

金属水素化物による水素の貯蔵に関しては次のような観点から検討されねばならない。

：　1）単位重量または単位容積当りの水素量

2）長時間の貯蔵の際の損失

3）取り扱いの簡便さ

表4—10には，各種の燃料のエネルギー密度を比較して示す。又表4—11には，輸送用機器に搭載する場合を想定して，ガソリン55ℓに相当するエネルギーを水素でまかなう時に必要とする金属水素化物の重量，容積についての数値を示す。表4—12には金属水素化物の組成と水素解離圧の実験値の一例を示す。長時間の貯蔵に際して水素解離圧の大小が損失を決める重要な因子となる。常温で固体の金属水素化物を使用する場合，高圧容器や複雑な容器を必要としない利点がある。以上の点から，金属水素化物は高圧気体，低温液体に比べて貯蔵方法として有力なものといえる。

4—5　現状技術と将来

これ迄水素ガスの需要面からの機器仕様について検討して来たが，いずれの場合にも，その大規模な容量に対して現状技術は，実績はない。従って，現状技術の将来の大きな問題は，

表4－9　金属水素化物の熱力学関数

水素化物	A	B	$-\Delta H_f^\circ$ (Kcal/mol)	$-\Delta G_f^\circ$ (Kcal/mol)	$-\Delta S^\circ$ (Kcal/Kmol)
LiH	9600	11.23	21.79	16.16	18.9
MgH_2	3830	9.76	17.79	8.17	32.3
CaH_2	9610	7.35	41.65	32.61	30.4
LaH_2	10847	10.64	49.6		
TiH_2	6671	9.35	29.6	-20.6	30.3
$ZrH_2(\varepsilon)$	8040	9.18	38.9	-29.32	32.1
NbHx	3575 - 4425	6.17 - 8.77			

表4－10　各種燃料のエネルギー密度の比較

	高圧水素 (200気圧)	液体水素	Mg(93%)Ni(6%)	V	Nb	高圧メタン (200気圧)	n-オクタン (液体)
有効水素量 (g当量/g)	0.99	0.99	0.070	0.021	0.0084	-----	-----
(g当量/cc)	0.016	0.07	0.125	0.103	0.071	-----	-----
発熱量 (cal/g)							
(cal/g)	33900	33900	2400	704	285	13000	11400
(cal/g)	568	2500	4270	3520	2430	1900	8000

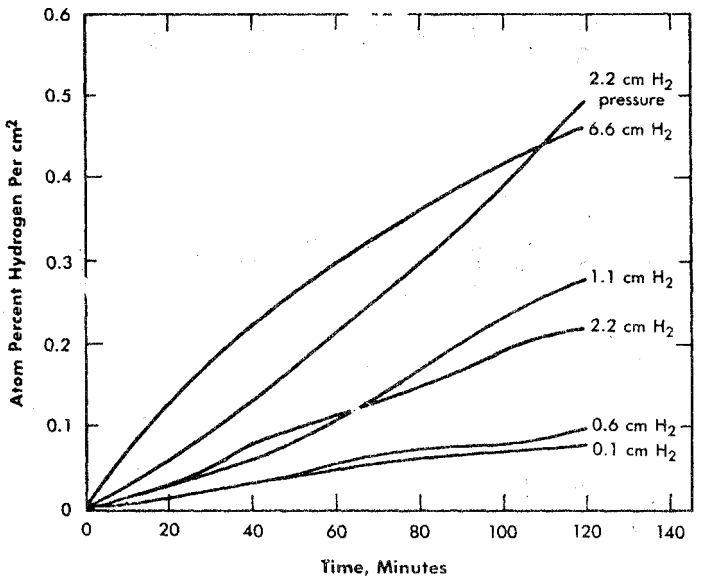


図４－９　水素圧を変えた時の吸蔵変化

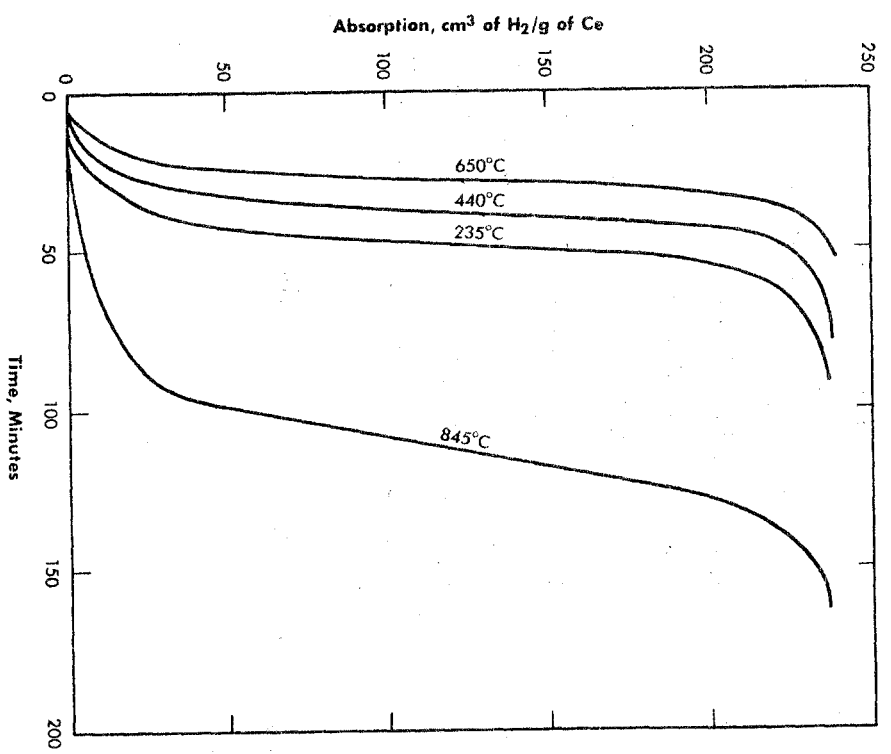


図４－１０　セリウム－水素系での吸蔵変化

表4－11　金属水素化物の組成と水素解離圧

系	組　成	平衡解離圧
Mg(93%)Ni(6%)	0.1 - 1.85	3atm. at 323°C
V	0.83 - 1.87	4 - 9atm. at 36°C
Nb	1.15 - 1.95	3 - 9atm. at 58°C
$LaNi_5$	1 - 6	12atm. at 80°C
Mg_2Cu	0.1 - 0.9	4atm. at 280°C
FeTi	0.1 - 1.0	10atm. at 50°C
AB_5	1 - 7	50atm. at 60°C

(A: La 27, Ce 50, Nd 16, Pr 5, other 52
B: Ni)

表4－12　金属水素化物の重量、容量

水素化物	水素の重量%	重　量* Kg	容　積* lit.
Liq.H_2	100	21.0	300
CH_4	21.13	83.5	201
MgH_2	7.66	275	190
AlH_3	10.08	208	160
SiH_4	12.55	167	247
CaH_2	4.79	438	230
TiH_2	4.40	520	133
$LiBH_4$	18.51	114	171
$LiAlH_4$	10.62	197	216
$Mg(BH_4)_2$	14.93	141	108
Mg_2NiH_4	3.60	606	<190
$LaNi_5H_6$	1.38	1522	201

＊水素21.0 kgを取り出すに必要な水素化物の重量とそのときの容積

(1) スケール・アップの可能性

(2) スケール・アップ開発に伴う信頼性の確保

(3) 経済性：total の運転コスト

(4) オルソ—パラ変換

が従来からのエネルギーシステムに対抗し得るかどうかにある。以下各項目にわけて検討する。

(1) スケール・アップの可能性

表7—2の例にもある通り，2020年迄に段階的にエネルギー需要の増加と共に水素エネルギーへの転換を考慮したとしても，国内の現状技術では追随出来ない所にあるといってよかろう。そして，今后何年かにわたるのであろう大型水素液化装置，圧縮機，高圧タンクの開発は至難を極める事になると考えられる。特に金属水素化物については，その安全性の点で特に小規模の民生用貯蔵があるとすれば他の形態の貯蔵よりもすぐれており，より安全な貯蔵，利用の開発が急務となろう。

(2) 信頼性

一般に大型機器になる程信頼性が低くなっているこの一例は，空調用冷凍機器の規模別要求信頼度の数値を，表4—13に示した。これでみる通り，ルーム・クーラー，家庭冷蔵庫等，民生利用段階でのMTBFを実に100万時間，そして無故障保証としても，5～10年を目標にしており現実に達成しつゝある。しかしながら大型機器ではMTBFは1～2万時間程度を低迷しており，保証時間としても1年間程度である。機器としてはかなり発達している空調機器に於てさえもこのような状況にあり，水素エネルギー機器に於ても信頼性は大型，民生用機器，共に困難な問題であろう。しかし水素エネルギーシステム開連機器は，これ以上の信頼度にもっていかないと，システム安全性の確保が保証されない。

特に保守のし易い産業用機器は別として民生用機器の操作性，安全性も含めた信頼性を開発する必要がある。

(3) コスト

現有技術を基準にした場合の貯蔵コストの比較を表4—14に示した。

表 4 − 13　空調機器用冷凍機の信頼度要求

「冷凍」Vol.47

機　種	圧縮機出力(HP)	用　途	保証期間		MTBF 10^4時間	保証期間の（無故障時間）信頼度
			年	時間		
超小型	1/12～1/2	家庭冷蔵庫	5	43,800	100～200	95.6～97.8%
小　型	1/4～1½	小型エアコン	3	20,290	5～ 10	59.1～77.0
中　型	2 ～ 3	パッケージエアコン	1	8,760	2 ～ 3	64.4～74.6
大　型	5 ～ 20	パッケージエアコン	1	8,760	1 ～ 2	41.7～74.6

MTBF：Meen Time Between Fai

表4－14　各種コスト比較

	LH_2／LNG 比
液化装置	2.8
液化エネルギー	2.0
貯蔵タンク	4.8
（0.4×10^{12} Btu を基にした）	

エネルギー貯蔵設備のための投資

	貯蔵単位 (gal)	単位コスト（体積ベース）	単位コスト エネルギーベース $/$10^6$ Btu
気体水素			
ボンベ（170 atm）	小	$5.00／gal	750.00
抗道	5×10^6	$1.00／gal	350.00
液体水素（LH_2）	1×10^6	$1.00／gal	26.00
アンモニア	10×10^6	15.7¢／gal	2.90
メタノール	10×10^6	5.5¢／gal	0.80
液体天然ガス（LNG）	25×10^6	30.0¢／gal	3.50
石油	10×10^6	5.5¢／gal	0.40

小容量貯蔵装置のための投資

	容器の体積 2×10^6 Btu c) 現在	大量生産 a)	50×10^6 Btu 現在	燃料・容器の比エネルギー容量 Btu／lb	Btu／ft^3
液体水素	$2,000	$1,200～1,800	$1,500	8,000	140,000
高圧水素（170 atm）	1,500	1,200	36,000	1,200	40,000
水素化マグネシウム MgH_2 b)	—	160	—	5,000	250,000
アンモニア NH_3	170	100	500	6,000	250,000
メタノール CH_3OH	35	35	150	8,000	510,000
液体天然ガス LNG	700	300～500	7,000	6,700	350,000
ガソリン	30	30	100	16,000	950,000
鉛蓄電池		15,000	—	80	10,000

a）現在の技術水準を使う

b）Mg 40¢／lb、容器なし、熱交換器なし、50％空間率

c）自動車用タンクの大きさ

これによると石油に比べて水素エネルギー系は，やはり10倍ないし100倍のコスト高を示しているが，液体水素に関しては，今后共技術開発を発展させる必要がある事を示している。もちろん，大規模貯蔵と小規模貯蔵では，単純なコスト計算だけでなく，それぞれの条件の違いがあり，重みづけも違ってくるから，こゝでは一概に比較出来ないが，それ以前の問題としてエネルギー貯蔵密度の高い安価な貯蔵法を開発する必要がある。即ち液体水素はもちろん，金属水素化物についても，開発の可能性があり，単位重量当り吸収貯蔵効率が高い材料を開発する必要がある。又液体水素貯蔵の場合には，容器の問題，特に荷重構造も含めた断熱構造の問題が一つのテーマになると考えられる。

(4) オルソ—パラ変換

H_2のオルソ—パラ変換は，液体H_2を貯蔵しようという場合是非行っておかねばならない。室温のH_2はオルソ水素とパラ水素の混合でその比率は3：1であるが，20Kで平衡な液体H_2は殆ど全部パラ水素となる。然し室温のH_2をそのまゝ液化した場合室温の比率を保っていて数日かゝって変換熱を出す。この変換の触媒としては酸化鉄或は水酸化鉄が使用される。然しこの粉末が飛散しないように且つ触媒効果が劣化しないようにするには如何なる形体をとるべきか，研究すべき問題と考える。尚不純物の吸着剤は或程度オルソ→パラ変換の触媒作用を持っているので熱力学的に有利に作用することとなる。

§5　輸送・分配

5－1　概　要

気体水素，液体水素，メタルハイドライドの3種類を比べるとき，貯蔵の項でも述べられているように，メタルハイドライドは特殊の用途で小量消費の場合が一応の対象となろう。

液体水素はその輸送コストは必ずしも著しく高価につくということではないが，液化系の設備，運転費が何分高価となるので，ピークロードに対するコンパクトな系が要求されるとき，あるいはエネルギー輸送系としてと同時に例えば電力送電のロスを少なくする低温系としての機能を評価されるときにクローズアップされるものであろう。

気体水素系としてはこれまでに天然ガス，都市ガス配管系との類比から，西ドイツやアメリカにおける経験を生かして実際的な設計が可能である。

輸送上の安全からはメタルハイドライドが有利な点も存在するが液体水素・気体水素の系も含めていずれも水素として空気中に漏出することが考えられるのでその検知，対策は充分考慮してあらかじめ対処する必要がある。

各種エネルギー輸送方式を300マイルの輸送に対して比較した例が図5－1に示されるが，これによれば輸送費は水素ガスの場合天然ガスに比べて2～3倍　吊下送電線の約1／5，地下送電線の約1／7となる。

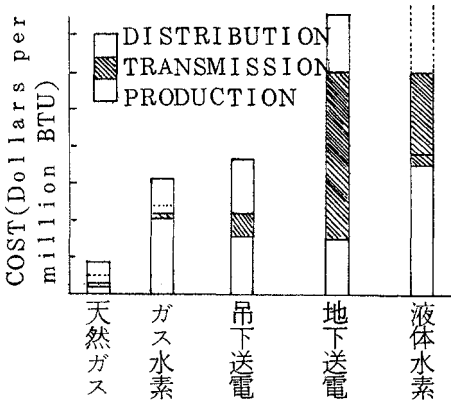


図5－1　COMPARATIV COST OF DELIVERED ENERGY

5－2　気体水素

5－2－1　水素ガスパイプラインの現状

(1)　西ドイツでは1938年　Hüls社が余った水素をVeba-Chemie社に供給して以来，化学工場供給用の水素ガスパイプラインが存在し現状では図5－2の如くであり，総延長は208kmに達し，総供給量は

40.000Nm³／n（堅形3段ピストン式容量6000～16000Nm³／hrのコンプレッサー3台）である。

供給水素の純度は97.5～99.9 vol%である。運転は圧力保持方式をとり設計圧力は25 kg／cm² であり，供給者端で15～18 kg／cm² の圧力が得られるように運転されている。

強度設計はDIN−2413，材質規準はDIN−17172 Pipe 材質はDIN RST 347又は387によっている。工事施工はDIN−2470によるので溶接パイプの使用は困難ですべてシームレスパイプを使用している。溶接部からのリークは施工規準で防止できると考えているが，安全対策として全パイプラインを2～8 km間隔で区分して，各区間の圧力を監視し圧力降下割合の測定により配管断面積の5～8%の穴からのリークを対象にして緊急遮断弁を操作する機構を設け，また遮断弁附近の安全は，安全弁及びそれに結合したフレアスタックにより確保しようとしている。さらに保安上市街地では2週間に1回，その他で4週間に1回の割合で水素検知器による検知を2 km／日，検査員の速さで行っている。

配管は地下約1 mに直接埋設され，配管の伸び縮みに対してはフタッフィングボックス方式のエクスパンションジョイントを設置し，配管にはアスファルト，プラスチック塗装を行う他，1958年頃より電気防触も併用されている。

(2) その他には次のような配管例がある。

(i) エアプロダクト アンド ケミカル社

距離　12マイル程度（ヒューストン地域）

圧力　200 psi

管径　8″

(ii) ユニオンカーバイド社

距離　1～2マイル

容量　50トン／日

(iii) ヨハネスブルグ（南アフリカ）

距離　50マイル

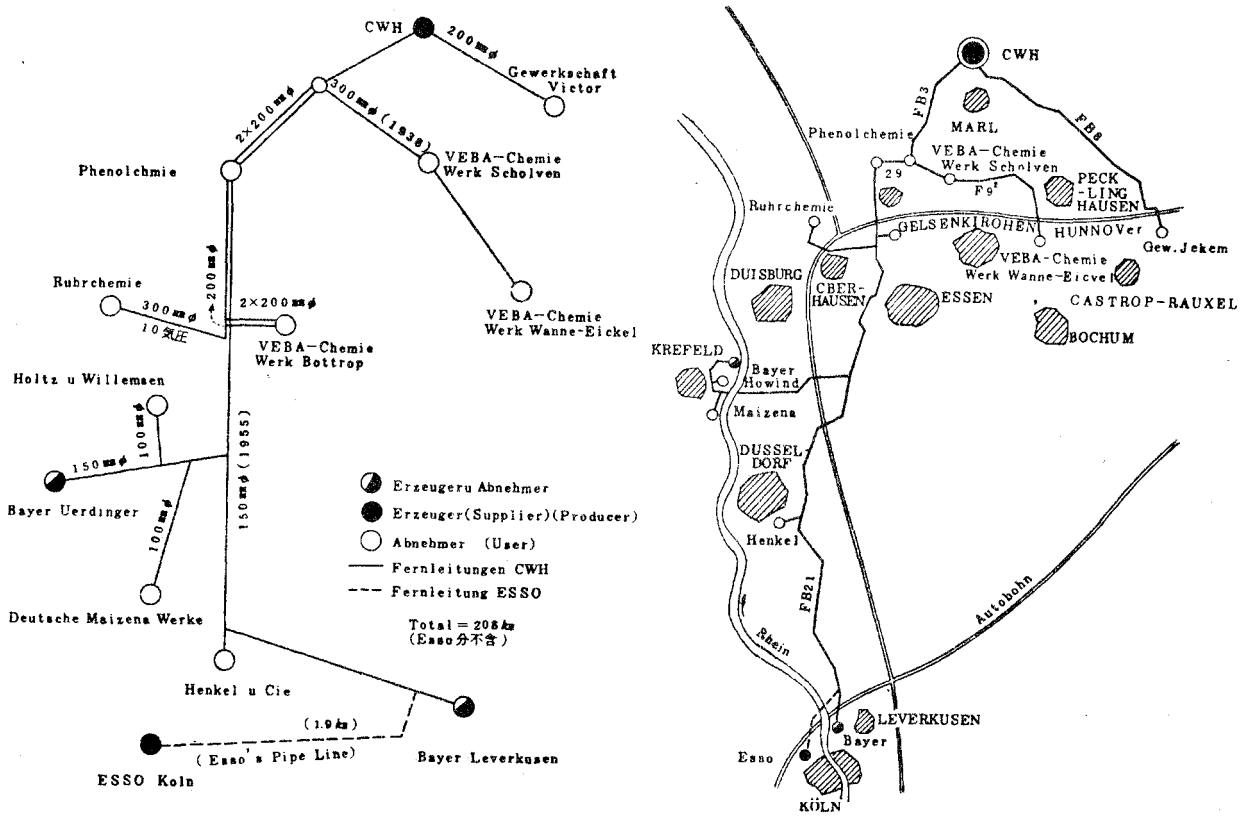


図５－２　水素パイプラインの例

５－２－２　都市ガス（メタン系）配管の現状（日本）

都市ガス配管の一つのパターンは図５－３の如く，都市入口まで輸送し，消費者端までに１～２段階圧力を下げて調節する方式である。

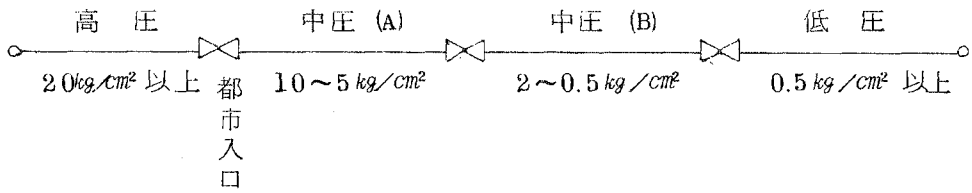


図５－３　都市ガス配管の例

技術基準に関しては通産省告示第６３５号「ガス工作物の技術上の基準の細目を定める告示」（昭和４５年）が行われている。

配管の厚さは第７６条，導管の材料は第８４条，導管及びその附属設備の構造及び導管の接合方法については第８５，第８６条に述べられており，該当するＪＩＳ規格が記されている。

5－2－3　天然ガスパイプライン系

本系では通常約1.3の圧縮機圧力比が用いられている。例えば平均供給圧750 psig，平均温度520 °R(約16℃)

コンプレッサーステーションで昇圧比1.3～1.5であるとき，管内圧力降下が3psi／milであれば圧縮機は65～100マイル間隔で配置されることになる。表5－1に基準データを示す

表5－1　天然ガスパイプラインに対する基準データ

	パイプライン直径　インチ			
	24	30	36	42
14.62psia, 60°Fでのガスの流量、10^6CF／日	285	525	860	1280
BTUで表わした流量（全体）、10^9BTU／年	109,162	201,206	325,080	490,560
標準条件でのステーション容量(V_2)SCF／min	197,916	364,583	597,222	888,888
吸込み条件でのV_2, CF／min	3,934.6	7,248	11,872.9	17,671.2
入力(W)（補助なしのステーション）馬力	3,703.5	6,822	11,175	16,633
入力、BTU／min	157,176	289,525	474,267	705,914
燃料流量(V_{2f}), SCF／min	373	687	1,125	1,674
正味ガス流量（標準条件）(V_{2net}), SCF／min	197,543	363,896	596,097	887,214
正味ガス流量（入口条件）(V_{2net}), SCF／min	3,927.2	7,234.3	11,850.5	17,638
他の仮定				
圧縮機の全断熱効率	$\eta_{tad}=0.8$			
全エンジン効率	$\eta_E=0.4$			

5－2－4　水素配管網計画

(1)　従来の都市ガスラインの利用

従来の都市ガス，天然ガスラインを利用してそれを水素ガスで置換えるとどうなるかについて，先ず，コンプレッサーについて比較する

往復式の場合水素用にもそのままでも使うことができ同じ圧力比に対して体積効率はほぼ同一である。従って押しのけ量で考えるとき，輸送エネルギー量は水素でおきかえると1／4程度となる

ターボ式では例えば，天然ガスで圧力比1.3が周速800 ft/sで得られるとき，水素では1.027の圧力比にすぎない。云いかえれば圧力比1.3をうるには2500 ft／sの周速が要求されるがこれは困難であり，従っ

て多段のコンプレッサーにしなければならず圧力比 1.3 が適当かどうかも検討を要する点である。天然ガス用をそのまま水素用とするのは漏れ易さの点からもむずかしいといえる。

スクリュー式は 600psi 以上の高圧では使われないようであるが，高圧のものが得られれば有望である。

以上のような性質をもつコンプレッサーではあるが，圧縮機効率は等しいと仮定してエネルギー輸送量を比べることにする。

単位体積当りの発熱量の比は大気圧では水素：天然ガス＝1：3であるが，750psig では 1：3.83 である。

表5－2に比較した結果がまとめられている。即ち，天然ガスラインを変更しないで，水素におきかえるとすると26％に減少する。さらに効率の減少も考えれば24％以下となるといえよう。

表5－2

750Psia での水素と天然ガス輸送ラインの相対容量

ガス	圧縮機容量	圧縮機馬力	エネルギー供給量
天然ガス	1.0	1.0	1.0
水素	1.0	0.1	0.26
	2.1	1.0	0.56
	3.8	5.5	1.0

供給配管を並列ライン化するときはエンジン馬力は同一でよいが圧縮機容量としては大きいものが用いられなければならない。（図5－4参照）

コンプレッサーの運転動力源として天然ガスを使用する場合と，水素を使用する場合を比べると後者の燃料代（例えば $3.00／$10^6$ BTU）が前者（例えば $0.25／$10^6$ BTU）よりも高価になる点も含めて考えるべきである。

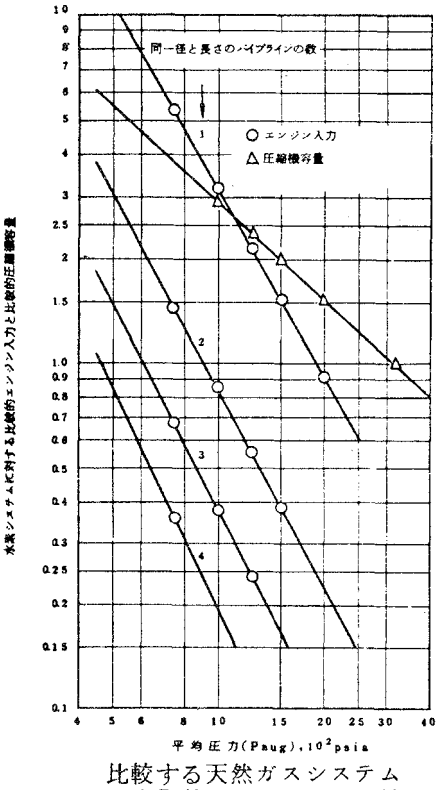


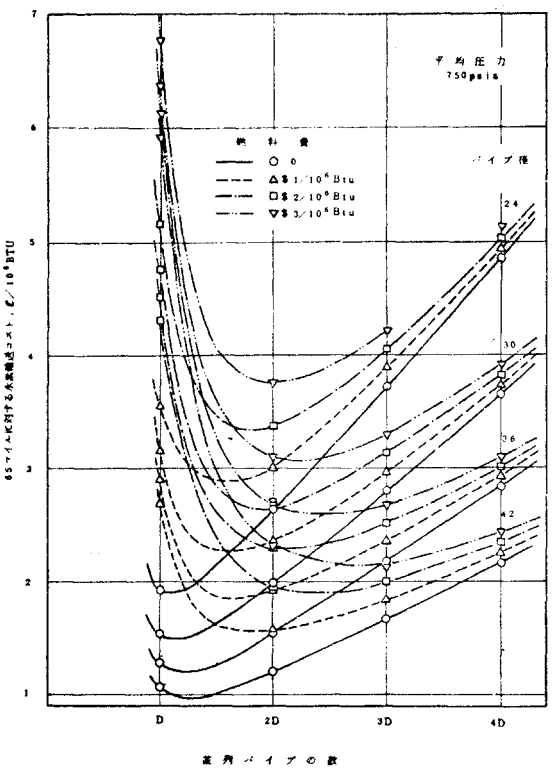
図5－4

比較する天然ガスシステムの全発熱量の100％を輸送する水素輸送ライン圧縮区間の比較特性

(2) 新水素パイプラインの計画について

既存のパイプライン，例えば天然ガス配管網をそのまま水素におきかえるのでは輸送量からみて有利になるとは言い難い。水素ラインを新しく敷設する場合には圧縮機ステーション，ステーション間隔，パイプ系列（径や並列本数など）をパラメータとして諸費用を算出して見る必要がある。

図５－５，５－６，５－７，５－８は，水素の各平均圧力に対する水素輸送コストを圧縮機ステーション間隔は一定，圧縮機はガスタービン駆動による水素用のターボ式と仮定し，燃料費，並列パイプ本数，パイプ系をパラメータとして計算した例である。



750Psia の平均圧力に対する水素輸送コスト

図５－５

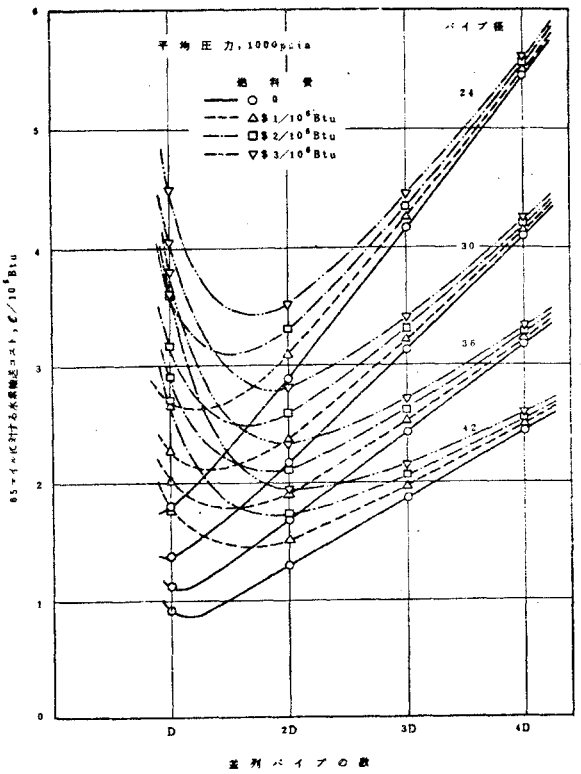
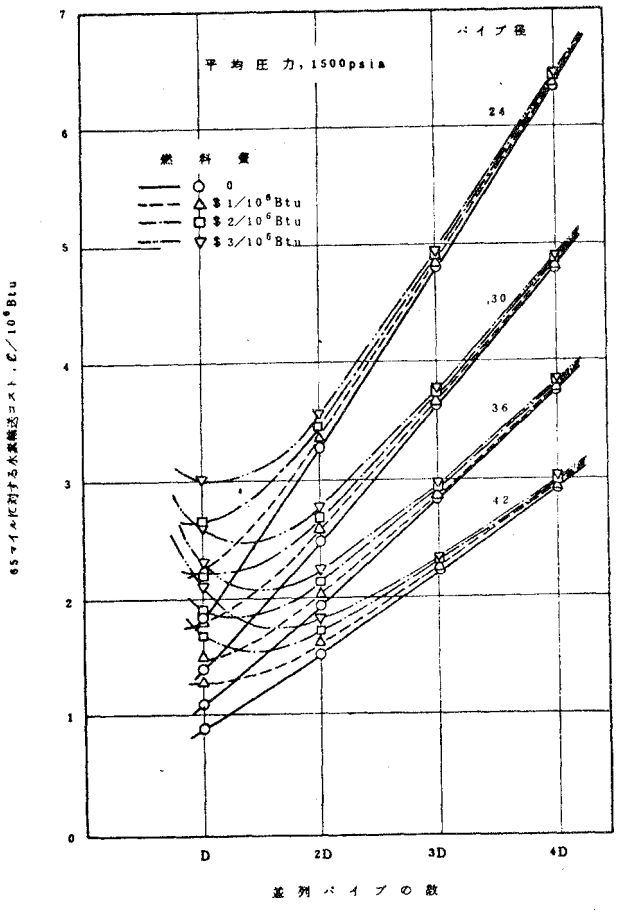
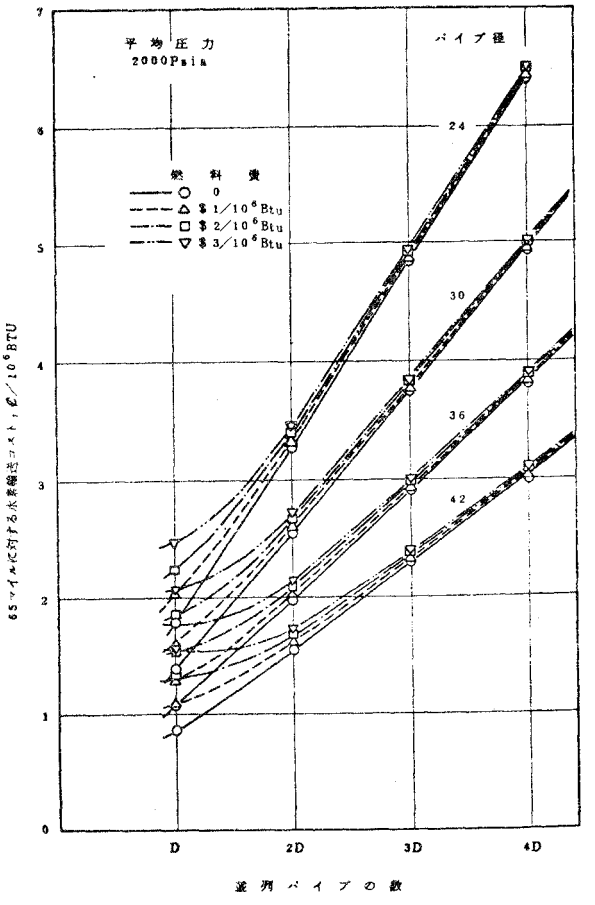


図５－６　1,000Psia の平均圧に対する水素輸送コスト



1,500Psiaの平均圧に対する
水素輸送コスト

図５－７



2,000Psiaの平均圧に対する
水素輸送コスト

図５－８

以上のパラメータについて最適化した水素系の結果を天然ガスと比べたのが図５－９である。

同じ圧力で比較して２倍～４倍の開きがみられる。2000psiに圧力を上げると約３０％のコスト低減が読み取れる。

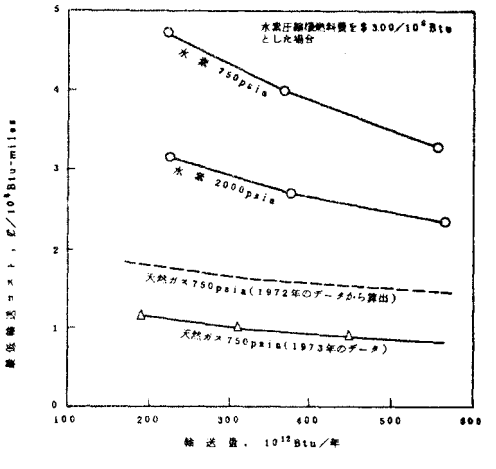


図５－９　天然ガスと比べた水素の
最適化した輸送コスト

水素パイプラインの最適設計に関係しての参考として設計式の一例を次に示す。

(1) $$V = \frac{\pi}{4} \cdot D^2 \cdot \bar{v}$$

流量 (m^3/sec)　管内径 (m)　線速度 (m/sec)

(2) $$t = \frac{P \times 50 \cdot D}{\sigma_A \cdot \eta} + C$$

肉厚 (cm)　許容応力 (kg/cm^2)　継手効率　内圧 (kg/cm^2)　くされしろ (cm)

(3) $$T = \frac{\pi}{4}\left(\left(D + \frac{t}{50}\right)^2 - D^2\right) \cdot \ell \cdot \rho$$

管重量 (ton)　長さ (m)　鉄比重 ($7.86\ ton/m^3$)

(4) $$C'mat = T \times @C'mat$$

材料コスト (yen)　単位材料コスト (yen/ton)

(5) $$C'valve = @C'valve \times Valve$$

バルブコスト (yen)　バルブ単価 (yen/個)　ℓm当りバルブ個数

(6) $$C'total = a \times C'mat + b \times C'valve$$

工事費比率……　工事費比率……地上，地中

(7) $$C\,total = C'total + 計装費$$

(8) $$Re = \frac{D\bar{v}\rho}{\mu}$$

レイノルズ数

ガス密度（kg／m³）

粘度（kg／m・sec）

(9) $$1/\sqrt{f} = 3.2\log(Re\sqrt{f}) + 1.2$$

→ f の算出

(10) $$\Delta P = \frac{4f \cdot \ell \cdot \bar{v}^2 \cdot \rho}{2gC \cdot D}$$

圧損（kg／m²）

重力加速度（m／sec²）

(11) 高圧生成 Ps 算出式中 $P_1 = P_2 - \Delta P$ として Ps 算出

(12) 動力費 = 0.7355・Ps

（kW）

(13) 年間経費の算出

5－3　液体水素

液体水素は貯蔵の項で述べられている通り，常圧における沸点が20.3°Kと極低温であり液体水素の生成の他，熱侵入防止が大きな問題である。液体水素使用上からも供給範囲は比較的狭い範囲と考えられる。先ず液体水素供給例（主として米国の現状）を列挙する。

5－3－1　パイプ輸送

(1)　J. F. Kennedy Space Senter

貯蔵システム850.000ガロンで内径61.5 ft. の球形タンクである。タンク材質はオーステナイトステンレス鋼であり設計内圧は90 Psigである。

加圧システムとしては2600ft・4inφアルミニウムコイルを用いてタンク内の液体水素を外気によって加熱し，気化させ圧力60psigを得ている

配管は6imφで長さ1500ftのものがある。管径10 inφの場合インバー製である。断熱方式としては真空及びスーパーインシュレーションを用い移送量は100g／min の他に200g／min の系があり計10.000gal／min の輸送供給が可能である。

(2)　Nuclear Rocket Development Statjon (Nevada)

貯蔵システムは500.000ガロンその気化率は0.05%／dayである。内径16 inφで長さ150ftの低圧配管，内径10inφで長さ75ftの高圧（2000psi）配管とがある。

移送量は35.000gal／min の規模である。

(3)　Aerojet General Corporation Liqnid Rocket Plant (California)

内径20inφ　長さ500ft　圧力600psi の規模である。

5－3－2　バッチ輸送

(1)　陸上輸送

1）トレーラ（自動車）

20.000ガロンが最大で13.000ガロンまでが一般的である。

2) 貨物列車

34.000ガロンが最大で28.000ガロンまでが一般的である。

トレーラには直径8 ft.長さ40ft.重量73.280lb の制限がある。

110時間気体放出なしの条件から熱伝導率が 5×10^{-5} Btu/hr ft °R

以下の断熱材例えばスーパーインシュレーションを用い，内側コンテナと外側コンテナの間の断熱材の厚さは1 in程度にしている。また加速度に関しては下方に2G，上向に1.5G，長手方向1.5G，横方向1.5Gとし，常温での材料強度に対して安全率4を見込んでいる。材料はステンレス鋼が用いられている。

陸上運搬機関に関する法令基準が表5－3に示される。

図5－10は1000ℓ 移動用タンクの例である。

表5－3 液体水素及び水素ガス分配に関する法令基準

Distribution Method	Equipment Specifications	Shipping Regulations	Installation Standards
Liquid Trailer	ASME/(Ref. CGA 341)	Special Permit	…
Liquid Tank Car	Title 49 CFR 179.400	Title 49 CFR 173.316	…
Liquid Customer Station	ASME ①	…	NFPA 50B
Gas Cylinder Trailer	ASME/Title 49 CFR 178.36—.37	Title 49 CFR 173.302	NFPA 50A

① ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section Ⅷ, Pressure Vessels, 1971.

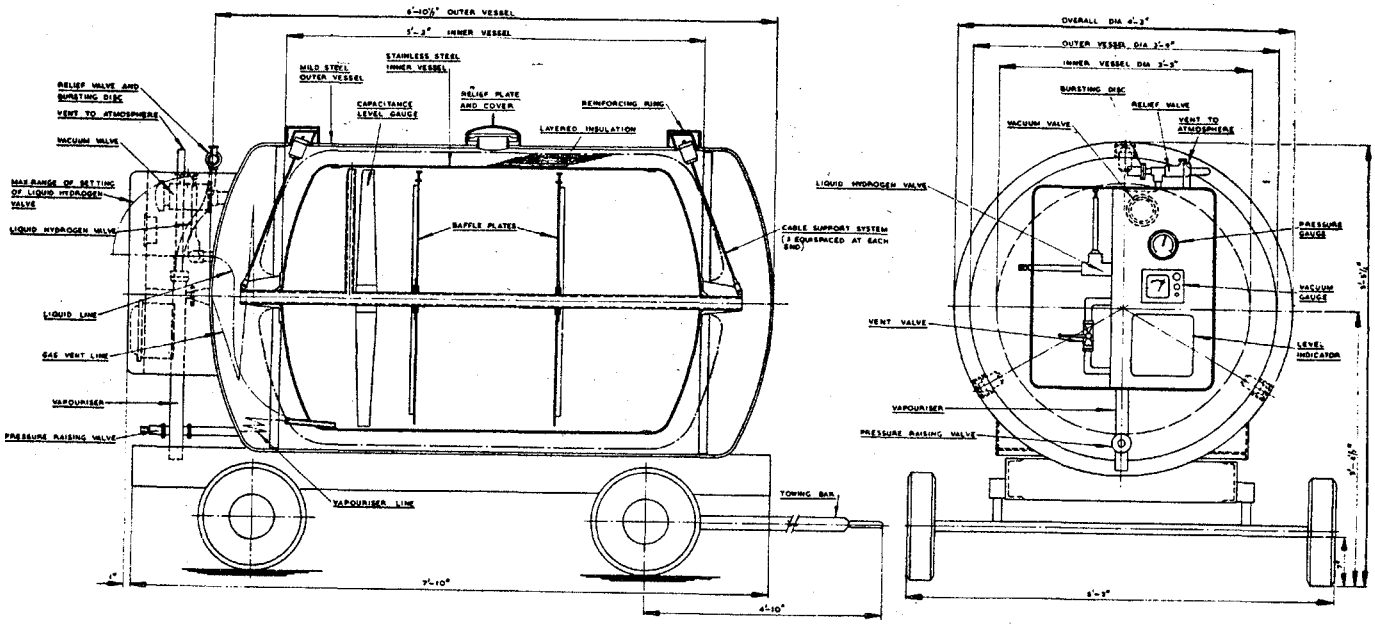


図 5 − 10　GENERAL ARRANGEMENT OF 1000 LITRE LIQUID HYDROGEN STORAGE VESSEL.

— Diagrammatic cross-section through 1,000-litre tank.　　Coupe schématique du réservoir de 1 000 litres.

Liquid　Hydrogen　Pergamon Pressより

(2)　海上輸送

液体水素用はしけには240,000ガロンのものが存在する図5－11の例では外槽は炭素鋼，内槽はSUS 304Lを用いている。諸元は表5－4に示される。

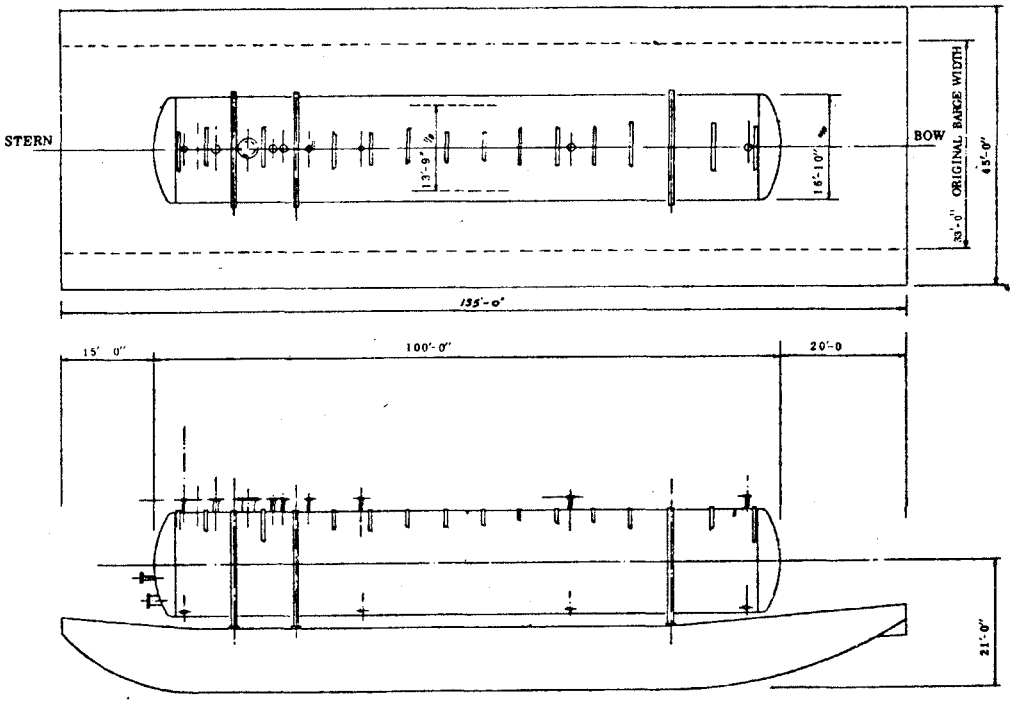


図 5 − 11　1,000M³ 液体水素はしけ

参照コードには

CG115　Marine Engineering Regulations and Material Specification; Subchapter F

CG257　Rules and Regulations for Cargo and Miscellaneous Vessels

などがある。

表5－4　1000M³ 液体水素はしけ主要諸元

Gross capacity	270,000 US gallons	Insulation	Granular perlite+vacuum
Usable capacity	240,000 US gallons	Allowable boil-off rate	0.15% per day
Outer tank diameter	22ft I.D	Design forces:	
Outer tank over-all length	26ft.in O.D	Longitudinal	Full weight×1.5
Outer tank material	ASTM A-285 grade C	Lateral	Full weight×0.5
Inner tank material	A-240 type 304L	Vertical up	Full weight×0.5
Design pressure	92.3 psia+full vacuum	Vertical down	Full weight×2.0
Design temperature	+130°F to -423°F	WIND	30 psf

(3)　液体水素の移送及びガス化の機構

液体水素は液体水素として運ばれる場合，ガス化して供給される場合とが考えられる。貯蔵タンクから運般機関へ移す方法には図5－12の如くタンク内水素を一部蒸発して加圧して供給する方法，及び液体水素ポンプで供給する方法とがある。

図5－13は液体水素タンクから燃料電池へ供給する系の例である。

なおガスで加圧する際に図5－14の如くガスの流れが液面を乱さぬようにガスを液面の上部空間の加圧ヘッダに設けた穴から逃すようにすれば液面下数cmのところはサブクールの状態に保たれよう。

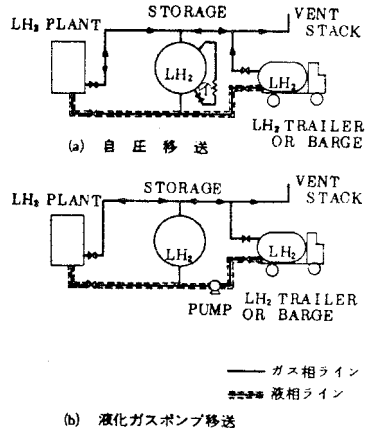


図5－12　液体水素移送方式

ガス化する場合には熱交換器が必要である。図5－15は液体水素の蒸発器の模式図で200°Fの温水を用いて液体水素を5000gal/minの割合で温度550°R 圧力1000Psigの水素ガスに変換する能力を備えている。

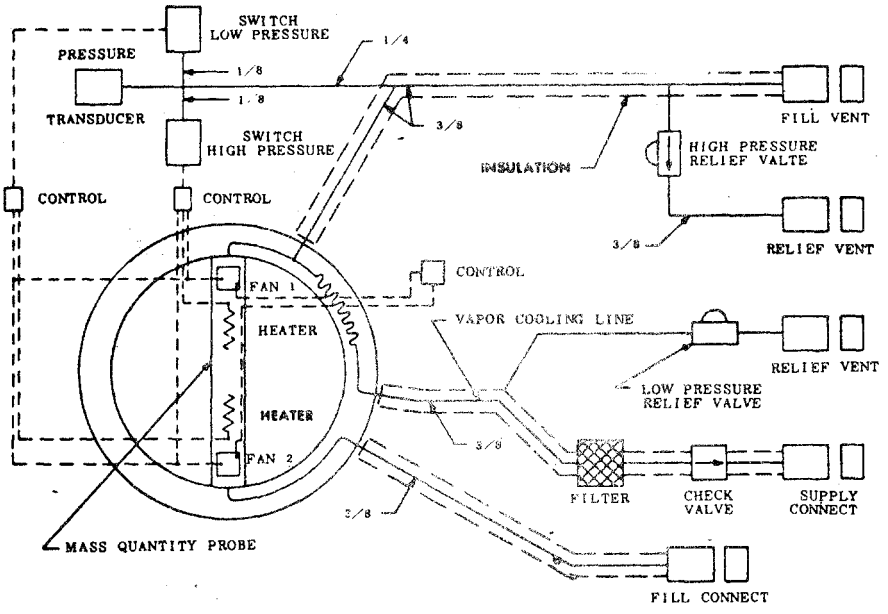


図 5 - 1 3　液体水素貯蔵タンクより水素を取出すシステムフローシート

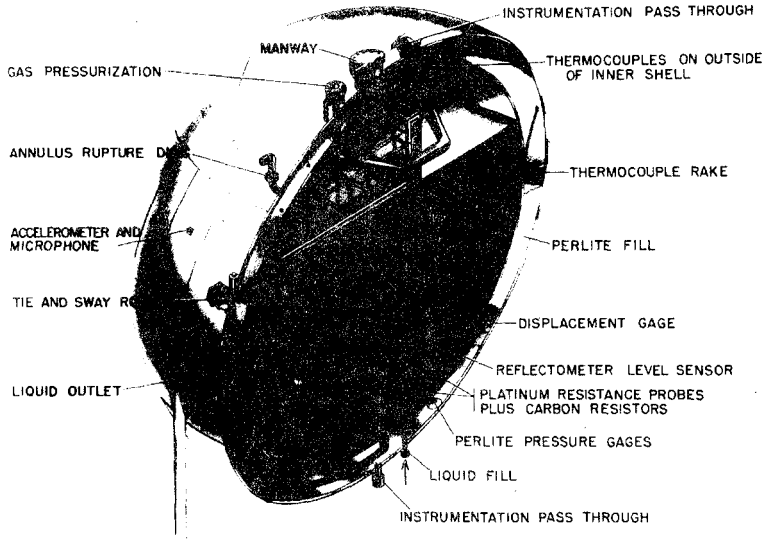


図 5 - 1 4　Cutaway view of a 500,000-gal liquid hydrogen dewar showing instrumentation.

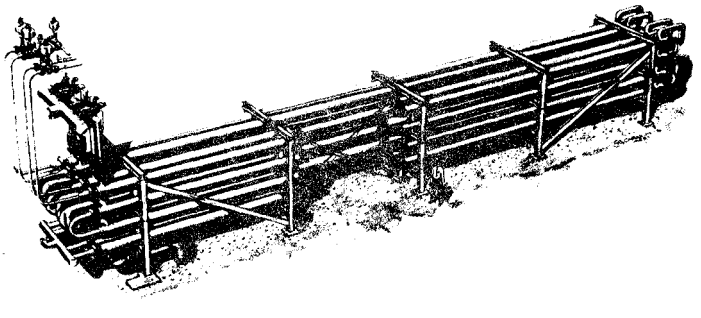


図 5 - 15　Schematic drawing of a large water-to-hydrogen heat exchanger.

5－3－3　液体水素輸送に関する経費の問題

次のような試算結果の報告がある。

産業地帯から250マイル離れた5000人の町のエネルギー消費量の半分即ち2×10^{9} Btu/dayを産業地帯にある液体水素源から供給することを想定して，

輸送方法としてトラック輸送と鉄道輸送を比べている。

トラック輸送では15.000gallonの車で1週間平均31車として投資額が$ 600,00　運転経費$450,000 1年，乗員の手当$600,000/年，10年間償却を想定し，利子を考慮すれば年間経費として凡そ$ 1156,000が算定されるのに対し，鉄道輸送では25,000gallon　タンク車で1週間平均19社，投資額$ 1,800,000，運賃$ 500/車，年間1,600車これらより年間経費は$ 820,000となる。即ち単価はトラック輸送で$ 1,58/10^6Btu鉄道輸送で1,12/10^6 Btu，ターミナル費が$ 0,19/10^6 Btuであるので合計すると前者では$ 5,27/10^6 Btu，後者では$ 4,81/10^6 Btu である。

一方ガス配管を敷設する場合，敷設費が$ 6,250,000昇圧ステーションに$100,000これを20年償却で考えると，ガス費用$1,15/$10^6$ Btuを加えて$1,55/$10^6$Btuにあたるのでやはりガス配管の方が経済的ということになる。

計算例からも分る如く液体水素を用いる場合の経費の増加は輸送量でなく液化費にあるので液化費が大幅に安くならぬ限りガス輸送にたちうちできないのが実際である。

従って，液体水素輸送のありうる形態としては液体水素の特質を生かして地下配管にして電力輸送などのメリットと合わせて考えられる場合であろう。

銅の電気抵抗は常温での値に比べ　LNG温度で1／4

LN_2 温度で1／10

LH_2 温度で1/200～1/500
（銅の純度による）

に減少する。

LN_2 温度で電力損失の90％が節約できるので液化費の関係で LN_2 を用いる方が一般に有利であろうが，1000MVAの電線では250mileで20％失われるため$1000／hrとなり，$LH_2$ を用いる意味がでてくる。送電線の一端で水素ガス他端では液体水素の需要がある場合には一層有利となろう。

5－4　安全問題

水素に関することではないが，例えば石油に関してみると燃料輸送の事故率は単位輸送量あたり，トラックを1とすると鉄道が約1／3，パイプラインが約1／1000というような割合にあり地下導管の安全度が高いといわれている。一方，一度事故が起ったときその事故の大きさの想定も同時に行なうことを忘れてはならず，その点，ガス配管の本管に事故があったときにはその規模は対処の方法によっては他に比べて比較的大きくなる可能性があるので十分な注意が必要である。

5－4－1　気体水素配管

気体水素配管系では特に水素雰囲気脆性に注意する必要がある。NASAでの研究によれば，高強度圧力容器材A－302，B級の試料を10,000Psiの純水素中において張力をかけると表面ひび割れが生じることが分った。その材料の分類は表5－5の如くである。

表5－5　水素雰囲気脆性に対する反応による材料の分類

腐食に極度に反応するもの：高強度鋼	
	マレージング　410，440C，430F　H－11，4140
	17－4PH，17－7PH
はげしく腐食されるもの：ニッケルとニッケル合金	ニッケル200，270
	インコネル625，70，718　Rene41　ハステロイ X
	Waspalloy，Udimet700
チタン合金	Ti－6Al－4V　Ti－5Al－2.5Sn
低強度鋼	アームコ鉄、HY－100　1042，A－302，A－517
	注：0.26～0.31％の炭素を含む×42……×65シリーズのパイプライン鋼材の特性はこのグループに入ると予想される。
コバルト合金	S－816，HS－188
普通に腐食されるもの：準安定ステンレス鋼	304L，305，310
腐食されないもの：K－モネル　ベリリウム銅合金2.5　純チタン　アルミ及び銅合金	
	安定なオーステナイトステンレス鋼　316，347，A－286

出典：H.Gray，NASA Lewis Research Center Materials and Strucuture Division

都市ガス配管系では一般に低強度鋼が用いられるが，これは表5－3 の分類でははげしく腐蝕されるものに属している。その程度は

① 温度：室温条件が厳しく，極低温と1200°Fではこの問題は起らない

② 圧力：圧力と脆性のひどさは1/2乗の関係にある

③ 純度：高純度の水素ほどひどい。0.6～0.7％の酸素があると防止効果があらわれる。水蒸気の効果は酸素に比べると小さい

の如く雰囲気条件によって変化するので実際のパイプラインの使用条件によって異なるが，その原因，対策が明白になっていない以上，今後研究していかなければならぬ重大な問題の一つである。

一方，ドイツの水素パイプラインシステムが1940年以来，無事故であるのは，雰囲気条件を選べば安全に行なうことができることを示すものであろう。

5－4－2 液体水素の問題

極低温流体の特質として次のような点があげられる。

1) 液を閉じこめたとき熱侵入によって一部ガス化することから生じる圧力上昇はさけられないので圧力安全装置，放出された水素の処理機構が必要である。

2) 配管内流動は熱浸入により一般に気液二相流となるので，それに基づく流れの振動が問題となることもあろう。通常その振幅は供給圧力の25％程度といわれているが，供給圧の3～4倍となる例も報告されているので注意が必要である。

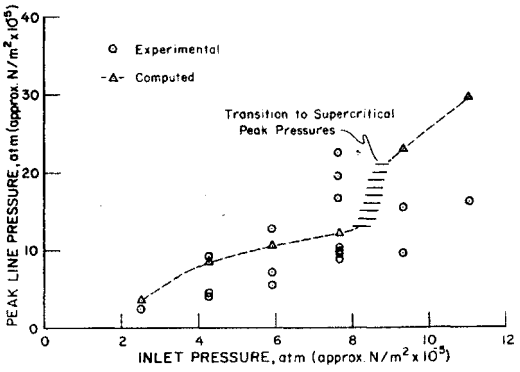
またボイド量が大きくなると，圧力損失の増加により供給能力が低下することも考えられる。

3) 定常時よりもcool downの過程に一層注意すべきものがあろう。

上述した1)，2)から容易に推測されるようにcool downの過程での圧力変動は大きくなり得る性質をもっている。

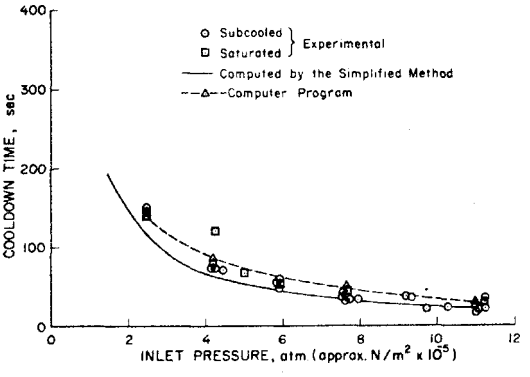
一例として図5－16 内径0.63inch 長さ200ftの管路でのcool down時における圧力変動の大きさを示すが入口圧力が高い程大きい。その割合は臨界圧力を越える附近で傾向が変る可能性のあることがうか

がえる。一方，cool down に要する時間も重要であるが，これは入口圧力と共に減少する傾向をもつことが図５－17に示される。



Effect of inlet pressure on peak surge pressure for 200-ft transfer line *A* with subcooled liquid hydrogen (ball valve).

図５－16　Advances in Cryogenic Engineering Vol 15より



Cooldown time for liquid hydrogen for 200-ft transfer line *A*.

図５－17

4) 常温からのへだたりが大きいので，熱収縮が当然大きくなる。

定常状態では特に内管の短縮からくる問題である。新しい移送管では熱応力を少なくするため内管をインバールにする場合がある。熱応力の計算は定常状態に対してはさしたる問題はないと思われるが過渡的な温度勾配に基く応力に対しては cool down モデルを考える必要がある。一般に急冷却に伴ない過剰な応力が発生し易いので冷たいガスをゆっくり流すか，液体水素をパルス的に流すかして予冷を行なうことが求められる。細かくいえば二相流などにおける成層化によって配管の底の方が温度が低いという温度分布も生じるなど，熱応力の問題には色々な性質が含まれている。

5) 液体水素特有の問題に酸素との反応，爆発があげられる。それは空気中の酸素が凝縮により濃度が濃くなるからであり，例えば foam insulation では熱応力によるクラッキングなどでその危険性が増すことが考えられる。

6) その他低温脆性も当然考慮されねばならない。

ところで別の見方ではあるが，

事故率を運搬様式で比べると鉄道ではアメリカを横切って運ぶ場合 1×10^{9}

ft^3 あたり一事故であるのに対し，トラックでは $1.5\sim2\times10^9$ ft^3 あたり一重大事故であるといわれる。後者の場合，$1.3\sim2\times10^6$ mile に対して一度の割合と評価されている。

5－4－3　金属水素化物

金属水素化物（MH）の特徴の一つは，安全性が高いことだといわれる。即ち何らかの原因でMH輸送系が破壊したとき，或る程度の水素はもれるが，放熱は吸熱反応であるため水素を放出すると温度が下り放出が止る自己制御的な傾向をもっている。しかし，MgNiのMHは250℃で H_2 1 atm であるが，FeTiは常温で10 kg／cm² の水素圧力を示すので充分注意が必要である。

メタルパウダーが大気に触れて粉塵爆発の可能性がある点も考慮されなければならない。

5－4－4　地下導管としての問題

①　管の外面の腐蝕

被ふく管を用いれば腐蝕をある程度くい止めることはできるが，電気鉄道，高圧電線の影響も関係して生じる電食の問題はさらに研究されねばならない。

②　他工事との関係

他の工事の誤りによる事故は少なくなく，埋設管の位置の正確な記録が必要なことはいうまでもないが，その路面への表示も必要である。また市街地の導管上に30 cmほど離して防護物を置いたり，導管の上に塩化ビニールの網をのせるなどして導管の露出以前に確認できるなどの対策は大切である。

③　自然災害

地すべりの起りやすい地域をさけ，地震に対してもパイプの強度，非常対策等を充分考えておく必要がある。

④　ガスの漏洩

㋑　検知システム

a）大リークの場合

管が破断したような場合には，それを圧力降下の時間的変化率の形で漏出位置も同時に検出できるシステムが必要である。

b) 小リークの場合

検査員によるモニターが全線にわたってなされる必要がある。とくに継手溶接部からのリークが対象となろう。

㋺ 安全装置

a) 大リークの検出信号は自動遮断機構に直結し，配管のある区間を他より切り離すシステムになっていなければならない。例えば配管断面積の数%の穴があくときが事故として想定される。

b) 小リークの場合でもその部分を含むある区間は供給を停止して修理する必要がある。

⑤ 配管の膨張・収縮

夏・冬昼夜の温度変化に対応して配管長が調節されねばならぬが，西ドイツでは図5－18のようにスタッフィングボックス方式のエクスパンションジョイントが用いられている。

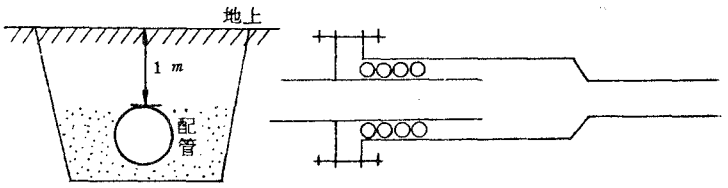


図5－18

5－4－5 水素のリークに伴う問題

㋑ 爆発の問題

水素が何らかの形でもれて空気中に拡散した場合，燃焼や爆轟が起りうる。表5－6に示される如く，水素はメタンに比べ可燃混合域も爆轟域も広いので，都市ガスの経験よりも慎重にならなければいけない。

従って，漏出もいち早く検知しなければならないが，一般家庭で水素が用いうるためには臭をつけ燃焼後には臭わぬ着臭剤（例えばcivetone）などが混入されねばならない。

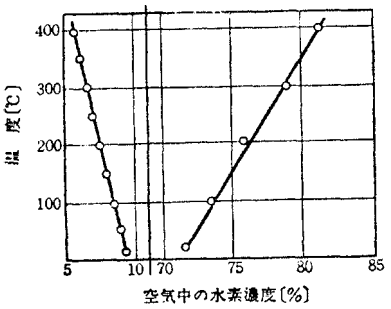
表５－６

	水　素	メタン
可燃混合域 (vol%)	4～75	5～15
最高燃焼速度 (cm／s)	325	45
爆轟範囲 (vol%)	20－65	6～14
最高爆轟速度 (km／s)	1.9	1.5
最小発火エネルギー(mJ)	0.020 (29.4 vol%にて)	0.33 (9.5 vol%にて)

可燃性ガスの最小発火エネルギーもメタンに比べ小さく，化学量論的にはやや濃度が低い附近で最小値をとる。

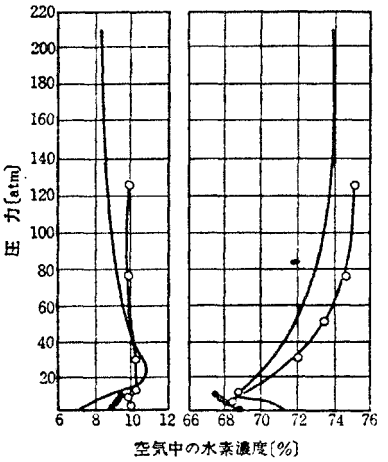
なお，爆発限界に及ぼす温度や圧力の影響は図５－１９，図５－２０に示される如くであり，温度が上ると爆発限界は広がる。圧力の影響は温度に比べ複雑であるが圧力が高くなると概して爆発限界は広がるといえよう。

火災が狭い間隙を通って隣りの可燃性空間内に伝播するに必要な隙間は火炎逸走限界と呼ばれるが，これは水素の濃度や隙の奥行によって変化し，図５－２１，図５－２２のような性質を有する。



水素-空気系の爆発限界に及ぼす温度の影響（直径 2.5cm の管中の下方伝ぱ）

図５－１９



水素-空気系の爆発限界に及ぼす加圧の影響

図５－２０

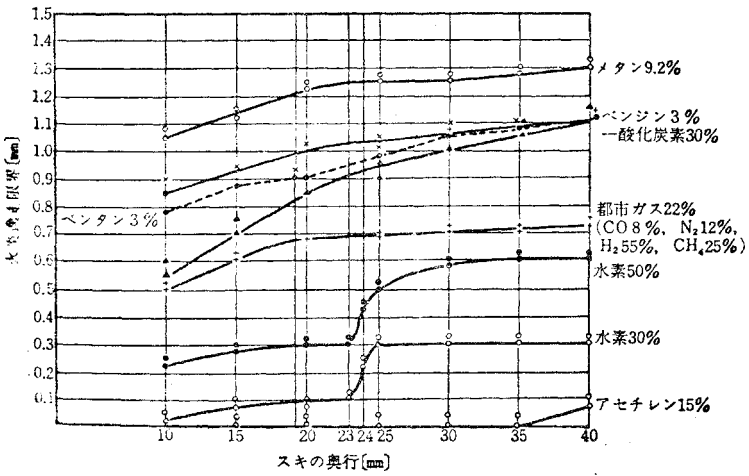
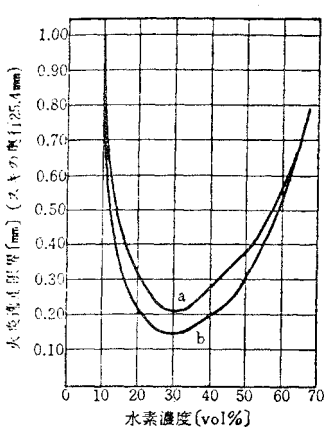


図5-21　スキの奥行による火炎逸走限界の変化実測例



a: 常圧（初圧 0 kg/cm²）
b: 初圧 0.5 kg/cm²
水素-空気混合ガスの濃度と火炎逸走限界との関係

図 5 −22

㋺ 噴出量の推定

ガス配管の場合,配管系内の圧力がP，その臨界圧力がPであって大気圧Poに対して$P^* > P_0$であれば破断口では臨界圧力における音速C^*で流出するので，ガス系の容量が十分大きい場合流出量Gは断面積をA，流量係数をΨとすれば

$$G = \Psi A \rho^* C^*$$

で与えられる。

$P^* < P_0$の場合には管内圧がPのとき

$$G = V_0 \Psi A \sqrt{2g\frac{\kappa}{\kappa-1} PV\left\{1-\left(\frac{P_0}{P}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}\right\}}$$

となる。

音速Cは水素が理想気体とみなしうる範囲では

$$C = \sqrt{\kappa R T}$$

κ ：比熱比　1.4

R ：ガス定数　421kgm/kg'K

T ：絶対温度

で与えられる。

噴出後の拡散については，詳細は省略するが，可燃域が漏出地点を中心にしていかなる範囲となるかを噴出量と時間をパラメータにして調べておく必要がある。

5－5　現有技術と将来

5－5－1　スケールアップ

気体水素としては，現状の延長として系を構成することができようが，使用条件からいって新しく発生する例えば水素脆性などの問題はあらかじめ充分研究されなければならない。

液体水素は，陸上のトラックあるいは鉄道輸送では輸送車の大きさには制限があり，運行回数を増す形でスケールアップに対処することになろう。

地下導管などの断熱配管系では長距離になればなる程ボイルオフするガス

の処理方法に問題があり困難さが増してこよう。この点は安全問題と密接な関係にある。液体水素系全体としては，液化過程に関係する経費が大きいので，その過程でのコスト低減方式の開発が緊急なことであることはいうまでもない。

ＭＨ系ではＭＨとして，安価に多量に得られる金属が入手できることが先ず先決であり，スケールアップとしてはそれからの問題であろう。

５－５－２　コントロールシステム

気体水素自体としては現状につながるものとして考えてよいが水素の漏洩に対していかなる遮断を行うべきかは大きな問題であろう。

液体水素系としては圧力を正常な範囲にそのためには断熱系を正常に保つ必要がある。

断熱系が破壊されたときどのような圧力制御法がありうるかは検討されなければならない。放出弁の設置間隔,放出した水素は燃焼させてしまうべきかなどその処理系との結合も重要である。

過渡的な問題としては cool dnwn の方法は，cool down に必要な最小時間及び過渡圧力限界，熱応力限界を目標値として含む目的関数を最適化する点から定められなければならないが複雑な問題を含んでいる。

一方，気体水素系と液体水素系との結合したシステムが負荷のピーク時の対策として，あるいは供給網の信頼度を高める意味などから構成されることもあろうが，負荷変動がゆっくりした場合はさしたる問題はないとしても，大きな急速な変動が考えられる対象に対しては例えば液体系のボイルオフ量と圧力の両者を制御することなど両系の応答は充分考慮されねばならない。

ＭＨ系としては，どのような結合，分離システムをとるかによりコントロールが異なるが結合，分離が熱の出入を伴なう化学反応であり，流体をバルブ開度やポンプ出力などで調節するのとは異なって一般に制御は困難であろう。応答速度は圧力で制御するか温度で調節するかによって異るが温度による場合，系のある部分の熱容量が問題となり，えられる速さが制限されよう。

§6　安全設計と安全管理

水素の精製，貯蔵，輸送分配について種々のシステム構成を検討するにあたって，特に留意しなければならないのは災害に対する対策，すなわち安全性についてである。近代産業の発達と生活の高度化に附随して消費されるエネルギーの量は格段に増大すると共に，各種の形態をもつエネルギーが，単に産業用にとどまらず，日常生活にも広く用いられている現状である。したがって，災害の発生する可能性も時と場所を選ばず，且つ，その発生機構も産業技術の進歩によりいよいよ複雑になってきている。この傾向は水素をエネルギーとして使用する場合においても少しも変ることはないのであり，各種災害の防止は重要な課題である。

水素による災害事故の中で最も大きいものは火災および爆発によるものであり，これを未然に防止することを第一に考えなければならない。そのためには，水素を取扱うために用いる装置，機器類が防災上の見地から完全なものであることは勿論，その操作や保守にも充分な予防策を講じておく必要がある。
したがって，水素の性質を知悉して設計ならびに管理の両面から安全を期することが重要な条件である。

6－1　材料の選択と強度

水素の精製，貯蔵，輸送用機器の材料選択にあたり，第一に考えるべきことは水素脆性の問題である。水素脆性は，材料の破壊，装置機器におけるクラック発生の原因となり，漏洩して水素が火災，爆発等の事故をひきおこすことになるからである。一般に水素脆性は炭化物とそこに捕捉 された水素との相互作用によって起ると考えられている。したがって，金属内部に水素の侵入を許さないような結晶構造をもつ材料が選択の対象となる。

耐水素脆性のすぐれた材料として，オーステナイト系ステンレス鋼が使われる。これは水素の拡散速度が遅いので水素の内部への侵入が起り難いためである。オーステナイトステンレス鋼はフェライト系が体心立方形であるのに対し面心立方形であって，室温付近の強度はやや低いが展延性に富み塑性加工が容易である。オーステナイト鋼には一定の炭素の溶解限があり，それ以上の炭素は炭化物となって析出する。この炭化物は水素脆性の原因となる。

そのため炭素と親和力の強いニオビウム，チタンを添加して炭素を安定化した安定化ステンレス鋼または低炭素ステンレス鋼を用いる。また，溶解度曲線より高温のγ相（オーステナイト）の領域に加熱して急冷する溶体化処理によって炭化物を消滅する熱処理方法がある。

表6－1にオーステナイトステンレス鋼の種類を示す。溶体化処理温度は

表6－1　オーステナイトステンレス鋼の種類（JIS 規格）

鋼種（かっこ内は旧記号）	化学成分〔%〕					引張強さ〔kg/mm²〕	伸び〔%〕	絞り〔%〕
	C	Cr	Ni	Mo	Cu（その他）			
SUS(27)304	<0.08	18～20	8～11			>52	>50	>60
SUS(28)304L	<0.03	18～20	9～13			>49	>50	>60
SUS(29)321	<0.08	17～20	9～13		Ti>5×%C	>52	>45	>60
SUS(32)316	<0.08	16～18	10～14	2.00～3.00		>52	>45	>60
SUS(33)316L	<0.03	16～18	12～16	2.00～3.00		>49	>45	>60
SUS(35)316J1	<0.08	17～19	10～14	1.20～2.75	1.00～2.50	>52	>45	>60
SUS(36)316J1L	<0.03	17～19	12～16	1.20～2.75	1.00～2.50	>49	>45	>60
SUS(39)301	<0.15	16～18	6～8			>60	>50	>60
SUS(40)302	<0.15	17～19	8～11			>55	>50	>60
SUS(41)309	<0.08	22～24	12～15			>50	>45	>60
SUS(42)310	<0.08	24～26	19～22			>50	>45	>50
SUS(43)347	<0.08	17～20	9～13		Nb+Ta >10×%C	>52	>45	>50

Siはいずれも<1.00%，ただしSUS 316は<1.50%，Pは<0.040%，Sは<0.030%，ブリネルかたさはいずれも<187．SUS 202．305．317，321，347 が追加されている．

1.000～1.200℃である。この中で18Cr－8Ni系，特にSUS 304がよく用いられる。SUS 304は溶接が容易である。SUS 321，SUS 347は安定化ステンレス鋼である。

表6－2に物理的性質を示す。熱伝導性が悪く，熱膨張係数が大きい材料

表6－2　オーステナイトステンレス鋼の物理的性質

旧鋼種	比重	比熱〔cal/g deg〕	熱伝導率〔cal/cm·sec·deg〕	熱膨張係数（10^{-6}/deg）	ヤング率〔kg/mm²〕	比電気抵抗〔10^{-6}/Ω cm〕
SUS(27)	7.90	0.12	0.039 0 (100℃) 0.052 0 (500℃)	17.3 (0～100℃) 18.4 (0～500℃)	19 690	72
SUS(32)	7.98	0.12	0.037 3 (100℃) 0.050 2 (500℃)	16.0 (0～100℃) 17.5 (0～500℃)	19 690	74
SUS(41)	7.98	0.12	0.033 2 (100℃) 0.044 8 (500℃)	14.9 (0～100℃) 17.3 (0～500℃)	20 390	78
SUS(42)	7.98	0.12	0.032 2 (100℃) 0.041 5 (500℃)	14.4 (0～100℃) 16.9 (0～500℃)	21 090	78
SUS(43)	7.98	0.12	0.038 6 (100℃) 0.049 3 (500℃)	16.7 (0～100℃) 18.5 (0～500℃)	19 690	73

は加熱冷却による変形，配管部分に高い熱応力を発生する等の欠点につながる。しかし，溶接性が良く，溶接後の熱処理を必要としないという点でSUS

304は有用である。SUS 304について，温度400℃，圧力270～300気圧の条件で，170～200時間，水素雰囲気による水素化処理の影響について実験した結果では溶体化処理をしたままのものでは脆性を示さなかったが，600℃で時効処理した材料では，引張り強さは10時間～100時間で10～20％減少した。しかし脱水素後強さは回復して，一方，伸びは1時間で10％，10時間で50％，100時間で70％の減少を示した。これは水素吸収によってオーステナイトからマルテンサイトへの変態があるためで，水素脆性を起し，表面にクラックを生ずる。ただし，水素濃度の低い場合にはほとんど脆性を示さない。

溶接の場合，オーステナイト系の溶接棒を使用すれば問題はない。

オーステナイトステンレス鋼以外で面心立方形の合金で比較的多く用いられるのはアルミニウム合金である。アルミニウムA 1050軟質の成分および機械的性質は次の通りである。

化学成分（%）					引張強さ	降伏点	伸び	使用可能最低温度(℃)
Cu	Zn	Mn	Si＋Fe	Aℓ	(kg／mm²)	(kg／mm²)	(%)	
＜0.20	＜0.10	＜0.10	＜1.0	＞99.0	11未満	＞3.5	(厚さ 3～12mm)	－250

このほかには銅合金があるが経済的に不利であり，あまり使われていない。

なお，水素の液化，液体水素の輸送，貯蔵などの低温領域下では低温脆性のおそれがある。図6－1に各種合金について衝撃値の温度変化を示す。軟鋼では衝撃値の急に低下する温度があり，その温度以下では非常に脆くなる。このような現象は体心立方形合金に見られるもので，オーステナイト系ステンレス鋼やアルミニウム合金には現われない。

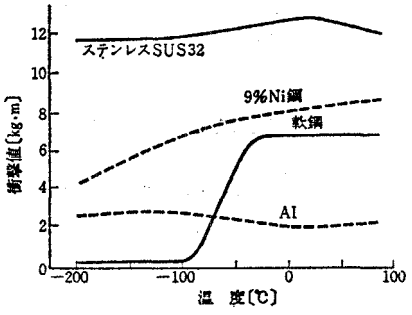


図6－1　低温における衝撃値

6－2　水素の特性

6－2－1　安全に関する特性

(1)　自然発火温度とは，他から火災や放電火花などの着火源を与えないで，可燃性物質を支燃性ガス中で加熱して発火させることのできる最低温度である。水素の自然発火温度は表6－3に示すように高温度であって空気中で572℃である。このことは一種の安全性を示している。

表6－3　酸素および空気中における自然発火温度

物質	酸素中 発火温度〔℃〕	酸素中 発火おくれ時間〔sec〕	空気中 発火温度〔℃〕	空気中 発火おくれ時間〔sec〕	物質	酸素中 発火温度〔℃〕	酸素中 発火おくれ時間〔sec〕	空気中 発火温度〔℃〕	空気中 発火おくれ時間〔sec〕
いおう			232	N	大豆油			445	N
アンモニア			651	N	テレビン油			255	N
ヒドラジン			270	N				253	N
水素	560	N	572	N				252	N
一酸化炭素	588	N	651	N	きり油			457	N
			609	N	なたね油			446	N
黄りん			30	N	パーム油			343	N
赤りん			260	N	ひまし油			449	N
あまに油			438	N	ロジン油			342	N
オリーブ油			441	N	ロート油			445	N
ガス油	270	N	336	N	砂糖	378	N	385	N
牛脚油			442	N	タンニン酸			527	N
クレオソート油			336	N					

このことは外災のないとき通常の水素が発火に関してかなり安全であることを意味する。

(2)　最小発火エネルギー

最小発火エネルギーとは，可燃性気体と空気混合物のような爆発性物質を発火させるために供給すべきエネルギーの最小限界値であり，発火源のエネルギーがこの値以下の場合は一般に発火は起らない。従って爆発に関する危険性を示す数値として重要である。

最小発火エネルギーの測定はスパークを使って，一部に燃焼を与え，その燃焼の感度を測定して比較する方法がとられている。

水素の最小発火エネルギーは表6－4に示すように，普通の燃料に比較して約10分の1ぐらいの値である。

このことは自然発火温度が高いという利点を相殺するように見える。実際に水素の排気や漏洩は非常に着火し易いことがこのことを証明している。たとえば水素をスタックから大気中に放出したときに排気中に含まれパーライトが静電気放電を起して水素が燃焼したことがある。

表6－4　空気中の可燃性ガスの最小発火エネルギー

物　質	化学式	濃度〔vol%〕	最小発火エネルギー〔mJ〕	物　質	化学式	濃度〔vol%〕	最小発火エネルギー〔mJ〕
（無機物）				エタン	C_2H_6	6.0	0.31
アンモニア	NH_3	21.8	0.77	エチルアミン	$C_2H_5NH_2$	5.28	2.40
水　素	H_2	29.5	0.020	エチルエーテル	$C_2H_5OC_2H_5$	3.37	0.49
硫化水素	H_2S	12.2	0.077	エチルメチルケトン	$CH_3COC_2H_5$	3.67	0.53
（有機物）							
アクロレイン	$CH_2{=}CHCHO$	5.64	0.13	エチレン	$CH_2{=}CH_2$	6.52	0.096
亜硝酸エチル	C_2H_5ONO	8.51	0.23	エチレンイミン	CH_2CH_2NH	6.44	0.48
アセチレン	$HC{\equiv}CH$	7.73	0.02	エチレンオキシド	CH_2CH_2O	7.72	0.085
アセトアルデヒド	CH_3CHO	7.72	0.376	エピクロロヒドリン	CH_2CHCH_2Cl (O)	5.64	0.43
アセトニトリル	CH_3CN	7.02	6.0				
アセトン	CH_3COCH_3	4.97	1.15				
イソオクタン	$(CH_3)_2CH(CH_2)_4CH_3$	1.65	1.35	塩化ブチル	$CH_3(CH_2)_3Cl$	3.37	1.2
				塩化プロピル	$CH_3(CH_2)_2Cl$	4.44	1.08
イソブタン	$(CH_3)_3CH$	3.12	0.52	ぎ酸メチル	HCO_2CH_3	9.47	0.62
イソプロピルアミン	$(CH_3)_2CHNH_2$	3.83	2.0	酢酸エチル	$CH_3CO_2C_2H_5$	4.02	1.42
				ジイソブチレン	$(CH_3)_3CCH_2C(CH_3){=}CH_2$	1.71	0.96
イソプロピルアルコール	$(CH_3)_2CHOH$	4.44	0.65				
イソプロピルエーテル	$[(CH_3)_2CH]_2O$	2.27	1.14	ジヒドロピラン	O(CH=CH, $CH_2{=}CH_2$)CH_2	3.12	0.36
イソプロピルクロライド	$(CH_3)_2CHCl$	4.44	1.55	ジ-*tert*-ブチルパーオキサイド	$(CH_3)_3COOC(CH_3)_3$	1.70	0.65
イソプロピルメルカプタン	$(CH_3)_2CHSH$	3.37	0.53	ジメトキシメタン	$CH_2(OCH_3)_2$	—	0.42
イソペンタン	$(CH_3)_2CHC_2H_5$	2.55	0.7	シクロプロパン	C_3H_6	4.44	0.24
シクロヘキサン	C_6H_{12}	2.27	1.38	1,2-ブタジエン		—	0.64
シクロヘキセン	C_6H_{10}	—	0.52	プロパギルアルコール	$CH{\equiv}CCH_2OH$	5.64	0.23
シクロヘキセンオキサイド	$CH_2CH_2CH_2CH_2CHC$ (O)	2.63	1.3	プロパン	$CH_3CH_2CH_3$	4.02	0.31
シクロペンタン	C_5H_{10}	—	0.23	プロピオンアルデヒド	C_2H_5CHO	4.97	0.32
シクロペンタジエン	C_5H_6	3.12	0.67	プロピレン	$CH_3CH{=}CH_2$	4.44	0.282
2,2-ジメチルブタン	$(CH_3)_3CCH_2CH_3$	2.16	1.64	プロピレンオキシド	CH_3CHCH_2 (O)	4.97	0.19
テトラヒドロフラン	$CH_2{-}CH_2$ / $CH_2{-}CH_2$ (O)	3.67	0.54	ヘキサン	$CH_3(CH_2)_4CH_3$	2.16	0.95
				ヘプタン	$CH_3(CH_2)_5CH_3$	1.87	0.70
トリエチルアミン	$(C_2H_5)_3N$	2.10	1.15	1-ヘプチン	$CH_3(CH_2)_4C{=}CH$	2.05	0.65
トルエン	$C_6H_5CH_3$	2.27	2.5	ベンゼン	C_6H_6	2.71	0.55
二硫化炭素	CS_2	6.52	0.015	ペンタン	$CH_3(CH_2)_3CH_3$	2.55	0.49
ネオペンタン	$C(CH_3)_4$	2.55	1.57	2-ペンテン	$CH_3CH_2CH{=}CHCH_3$	2.71	0.70
ビニルアセチレン	$CH_2{=}CH\cdot C{\equiv}CH$	4.02	0.082				
				メタノール	CH_3OH	12.24	0.215
ビニル酢酸	$CH_2{=}CHCH_2CO_2H$	4.44	0.70	メタン	CH_4	9.5	0.33
ピネン	$CH_{10}H_{16}$	1.65	2.7	メチルアセチレン	$CH_3C{\equiv}CH$	4.97	0.152
ピロール	$(CHCH)_2NH$	3.83	3.4	メチルエーテル	CH_3OCH_3	6.52	0.29
1,3-ブタジエン	$CH_2{=}CHCH{=}CH_2$	3.67	0.17	硫化メチル	$(CH_3)_2S$	4.44	0.48

図6－2に可燃性ガス濃度と最小発火エネルギーとの関係を示す。

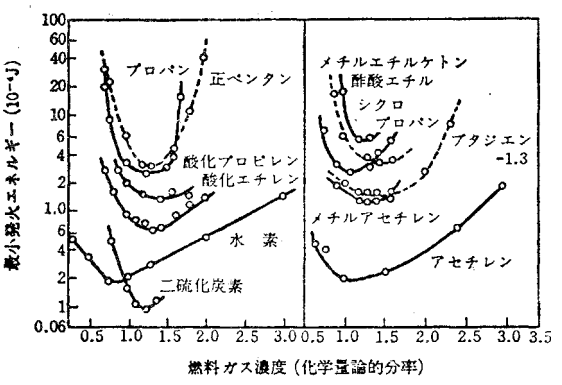


図6－2 可燃性ガス濃度と最小発火エネルギーとの関係

(3) 火炎逸走限界

火炎逸走限界は，背圧のある状態で狭い隙間を通って爆発性混合ガス中を火炎が一方の側から他方へ伝ぱするかどうかの限界寸法を示す値であり，可燃性ガスまたは蒸気の危険性を示す特性値である。表6－5に火炎逸走限界の実測値の例を示す。

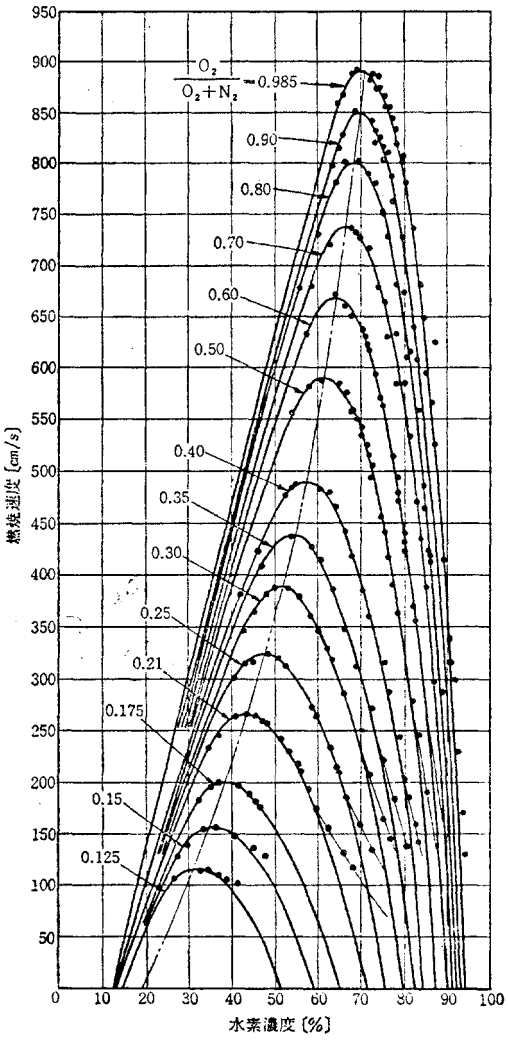
表6－5 火炎逸走限界の既知データ注1）　（単位：mm）

物質名	スキの奥行：25mm または 1in(25.4mm)				1/2 in (12.7 mm)	10mm
	M.[2] Hillebrand	B.S. 229[3]	H. Busch[4]	その他	B.S. 229[3]	H. Busch[4]
亜硝酸エチル		0.97				
アセチレン	0.02	<0.025	<0.025	0.16[5]		<0.025
アセトアルデヒド	1.00					
アセトン	1.00	1.02			0.86	
アミルアルコール		0.99				
アンモニア		3.38		3.18[6]		
イソオクタン		1.04				
イソブチルアルコール		0.97				
一酸化炭素	0.75	0.91	0.90			0.55
エタノール		1.02				
エタン	1.00		0.93			0.70
エチルエーテル	0.95	0.84			0.74	
エチルメチルケトン		0.84			0.76	
エチレン	0.50	0.71	0.70	0.69[7] 0.72[8]	0.53	0.28
塩化ビニル		0.97				
キシレン		1.07				
高炉ガス		1.19				
酢酸アミル		0.99				
酢酸エチル		1.04				
酢酸n-ブチル		1.02				
酢酸n-プロピル		1.04				
酢酸メチル		0.99				
酸化エチレン		0.66			0.48	
シクロヘキサン		0.94				
硝酸エチル		<0.025				
水性ガス		0.20		0.28[9]		
水素	0.15	0.10	0.30	0.28[10] 0.22[11]		0.025
石炭ガス	0.60	0.48	0.68	0.61[9]		0.50
デカン		1.02				
二硫化炭素	0.25	0.20	0.30			0.20
1,3-ブタジエン		0.84			0.69	
n-ブタノール		0.94			0.81	
ブタン		1.07	1.03			0.85
プロパン		0.97	0.90			0.70
n-ヘキサン	0.95	0.97	1.00			0.85
ヘプタン		0.91			0.74	
ベンゼン	0.95	0.99	1.15			1.00
ペンタン	1.00	0.89	0.98	0.99[7]	0.79	0.78
メタノール		0.91				
メタン	1.15	1.17	1.25	1.12[12]	0.99	1.05

注：1）本来の数値はすべて「火炎の逸走を生じない最大スキ（最大安全スキ）」である。

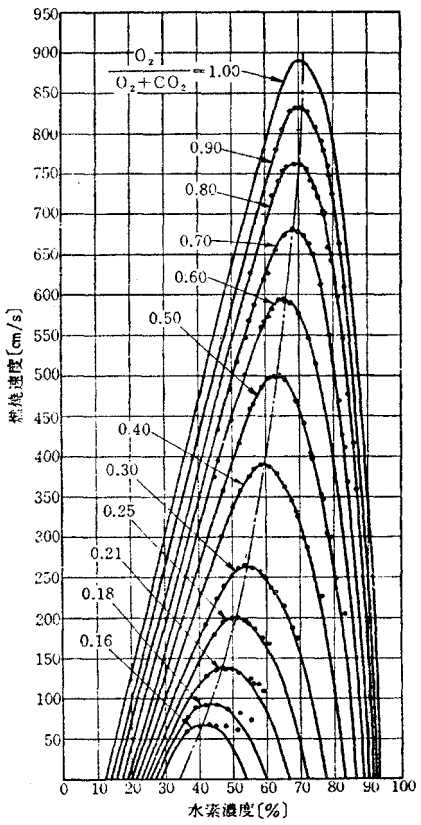
(4)　火炎速度

静止した気体中を平面燃焼波が進行する速度を火炎速度という。水素の火炎速度は一般の燃料よりはるかに早く，酸素と混合したときの速度は約 1.000m/s である。従って爆発に起因する事故には充分注意しなければならない。図 6 - 3 -(1)および(2)に混合ガス中における水素濃度と火炎速度との関係を示す。



酸素-窒素混合気中における水素の燃焼速度（常温，常圧，ブンゼンバーナー法）

図 6 - 3 -(1)



酸素-炭酸ガス混合気中における水素の燃焼速度（常温，常圧，ブンゼンバーナー法）

図 6 - 3 -(2)

(5) 爆発限界

可燃性ガスが空気または酸素と混合した場合，あるガス組成範囲で着火源の存在によってガス爆発を起こす。この範囲を爆発限界という。水素の爆発範囲が広いということは水素の取扱と重要なことである。表6－6に空気中の爆発限界の報告例を示す。また，表6－7に酸素中の爆発限界を示す。

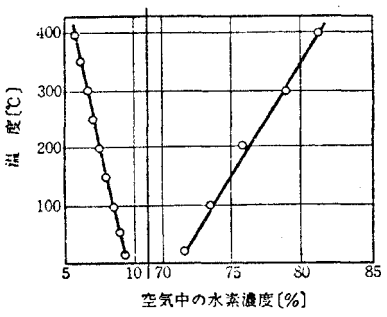
温度が上昇すると爆発限界の上限界が高くなり，下限界が低くなる。すなわち爆発範囲が広くなる。また圧力が高くなると爆発範囲は拡大する。これらの関係を図6－4，図6－5に示す。

表6－6　可燃性物質の空気中の爆発限界

物質	爆発限界〔vol %〕							
	文献 1)		文献 2)		文献 3)		文献 4)	
	下限界	上限界	下限界	上限界	下限界	上限界	下限界	上限界
1. 炭化水素類								
メタン	5.3	14	5.0	15.0	5.3	14.0	5.0	15.0
エタン	3.0	12.5	3.0	12.4	3.0	12.5	3.0 3.2	12.5 15.5
プロパン	2.2	9.5	2.1	9.5	2.2	9.5	2.1	9.5
n-ブタン	1.9	8.5	1.8	8.4	1.9	8.5	1.5 2.0	8.5
イソブタン	1.8	8.4	1.8	8.4	1.8	8.4	1.8	8.5
n-ペンタン	1.5	7.8	1.4	7.8	1.5	7.8	1.4	7.8
イソペンタン	1.4	7.6	1.4	—	1.4	7.6	1.3	7.6
ネオペンタン	1.4	7.5	1.4	7.5	1.4	7.5	1.3	7.5
n-ヘキサン	1.2	7.5	1.2	7.4	1.1	7.5	1.2	6.9 7.4
ヘキサン（異性体混合物）	—	—	—	—	1.0	7.0	1.0	7.0
2-メチルペンタン	1.2	7.0	—	—	1.2	7.0	1.2	7.0
エチレン	3.1	32	2.7	36	3.1	32	2.7	28.5 34
プロピレン	2.4	10.3	2.4	11	2.0	11.1	2.0	11.7
10. 無機化合物								
水素	4.0	75	4.0	75	4.0	75	4.0	75.6
重水素	5	75	4.9	75	5	75	—	—
一酸化炭素	12.5	74	12.5	74	12.5	74	12.5	74
アンモニア	15	28	15	28	16	25	15	28
硫化水素	4.3	45	4.0	44	4.3	45	4.3	45.5
二硫化炭素	1.2	44	1.3	50	1.3	44	1.0	60
硫化カルボニル	12	29	—	—	12	29	11.9	29
ジシアン	6	32	6.6	—	6	32	6.0	32 43
シアン化水素	6	41	5.6	40	6	41	5.4	46.6
いおう	—	—	2.0	—	—	—	—	—
ニッケルカルボニル	—	—	—	—	—	—	2	—
11. 混合物								
ピッツバーグ天然ガス	4.8	13.5						
他の天然ガス	3.8 ～6.5	13～17						
ベンジン	1.1	—						
ガソリン	1.4	7.6						
ナフサ	0.8	5						
ケロシン	0.7	5						
石炭ガス	5.3	32						
コークス炉ガス	4.4	34						
溶鉱炉ガス	35	74						
発生炉ガス	17～35	70～80						
水性ガス	7.0	72						
増熱水性ガス	5.5	36						

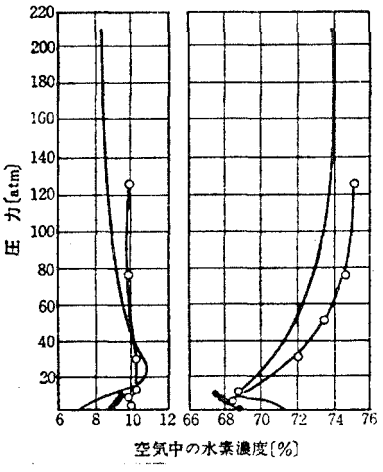
表 6 － 7 可燃性物質の酸素中の爆発限界

物　　質	爆発限界〔vol %〕		物　　質	爆発限界〔vol %〕	
	下限界	上限界		下限界	上限界
メタン	5.1	61	塩化メチル	8	66
エタン	3.0	66	塩化メチレン	15.5	66
プロパン	2.3	55	塩化エチル	4.0	67
n-ブタン	1.8	49	塩化ビニル	4.0	70
イソブタン	1.8	48	1,2-ジクロルエチレン	10	—
エチレン	3.0	80	トリクロルエチレン	7.5	91
プロピレン	2.1	53	2-クロルプロペン	4.5	54
1-ブテン	1.8	58	1-クロルイソブチレン	4.2	66
2-ブテン	1.7	55	臭化メチル	14	19
シクロプロパン	2.5	60	臭化エチル	6.7	44
ジメチルエーテル	3.9	61	1-ブロムイソブチレン	6.4	50
ジエチルエーテル	2.0	82			
エチルプロピルエーテル	2.0	78	水素	4.0	94
ジイソプロピルエーテル	—	69	重水素	5	95
ジビニルエーテル	1.8	85	一酸化炭素	15.5	94
アセトアルデヒド	4	93	アンモニア	15	79



水素－空気系の爆発限界に及ぼす温度の影響（直径 2.5 cm の管中の下方伝ぱ）

図 6 － 4



水素－空気系の爆発限界に及ぼす加圧の影響

図 6 － 5

(6) 可燃性ガスと空気との混合物を密閉容器内で着火すると，火炎が容器全体に急速に伝ぱして圧力が上昇する。この圧力を爆発圧力という。表 6 － 8 に爆発圧力の測定データを示す。この測定は常圧，65℃，10ℓ の容器中で行ったものである。表中の項目は次の内容を示す。

最高圧力……爆発圧力の最高値（kg/cm² abs）

最高圧力到達時間……圧力が上昇し始めてから最高圧力に到達するまでの時間（sec）

圧力上昇最大速度……圧力一時間曲線の最も急傾斜の部分における圧力上昇速度（ $kg/cm^2 \cdot S$ ）

圧力上昇平均速度…… $\dfrac{\text{最高圧力}}{\text{最高圧力到達時間}}$

表 6 － 8

ガスまたは蒸気の濃度〔vol %〕

	5	7	8	10	12	13	14	15	16	18	20	25	30	35	40
アセチレン															
最高圧力	5.6	8.5	9.4	10.1	10.4	10.5	10.3	10.1	9.7	—	7.9	7.0	—	—	—
最高圧力到達時間	0.0336	0.0192	0.0185	0.012	0.015	0.017	0.02	0.024	0.025	—	0.048	0.175	—	—	—
圧力上昇最大速度	175.8	443.0	703.1	773.4	843.7	843.7	773.4	562.5	457.0	—	316.4	98.4	—	—	—
圧力上昇平均速度	161.7	421.9	509.7	843.7	703.1	618.7	513.3	421.9	386.7	—	168.7	40.4	—	—	—
エタノール															
最高圧力	3.4	—	6.5	6.8	7.0	—	6.7	—	6.3	5.6	5.1	—	—	—	—
最高圧力到達時間	0.94	—	0.06	0.056	0.064	—	0.084	—	0.23	0.33	0.72	—	—	—	—
圧力上昇最大速度	5.3	—	144.1	175.8	161.7	—	145.9	—	84.4	22.9	16.7	—	—	—	—
圧力上昇平均速度	3.5	—	105.5	119.5	109.0	—	80.9	—	28.1	16.9	7.0	—	—	—	—
水　　素															
最高圧力	—	—	—	—	—	—	—	4.3	—	—	4.6	4.8	7.0	7.1	7.0
最高圧力到達時間	—	—	—	—	—	—	—	0.029	—	—	0.028	0.025	0.011	0.010	0.0112
圧力上昇最大速度	—	—	—	—	—	—	—	193.3	—	—	210.9	218.0	696.1	773.4	703.1
圧力上昇平均速度	—	—	—	—	—	—	—	147.7	—	—	161.7	189.8	632.8	703.1	618.7
メタノール															
最高圧力	—	—	4.6	5.6	6.0	—	—	6.3	—	5.9	5.3	—	—	—	—
最高圧力到達時間	—	—	0.22	0.08	0.08	—	—	0.06	—	0.10	0.18	—	—	—	—
圧力上昇最大速度	—	—	33.4	127.8	140.6	—	—	213.0	—	123.0	70.3	—	—	—	—
圧力上昇平均速度	—	—	21.1	70.3	73.8	—	—	105.5	—	59.0	28.1	—	—	—	—

また，表 6 － 9 に爆発圧力への温度の与える影響について示す。

(7)　燃焼熱

表 6 － 1 0 に酸素による燃焼熱を，また，表 6 － 1 1 に，燃焼生成物である水が液体の場合と蒸気の場合との値の差をそれぞれ示す。

表 6 − 9　爆発圧力に温度の与える影響

	80°F (26.6°C)	100°F (37.8°C)	150°F (65.6°C)	200°F (93.3°C)	250°F (121.1°C)	300°F (148.9°C)	350°F (176.7°C)	400°F (204.4°C)
ブタノール（空気中濃度 5%）								
最高圧力			7.3	6.7	6.3	5.8	5.3	5.3
最高圧力到達時間			0.064	0.05	0.049	0.05	0.049	0.038
圧力上昇最大速度			189.8	196.9	218.0	218.0	221.5	225.0
圧力上昇平均速度			112.5	133.6	126.6	112.5	109.0	140.6
ナフサ（空気中濃度 2%）								
最高圧力			6.3	6.0	5.9	5.3	4.9	4.6
最高圧力到達時間			0.07	0.068	0.057	0.056	0.052	0.050
圧力上昇最大速度			140.6	140.6	147.7	147.7	161.7	161.7
圧力上昇平均速度			89.6	89.6	103.7	94.9	91.4	93.2
ベンゼン（空気中濃度 3%）								
最高圧力			6.5	6.3	5.9	5.6	5.1	4.9
最高圧力到達時間			0.05	0.05	0.048	0.048	0.042	0.042
圧力上昇最大速度			161.7	179.3	195.5	210.9	210.9	218.0
圧力上昇平均速度			130.0	123.0	123.0	116.0	119.5	116.0
トルエン（空気中濃度 3%）								
最高圧力			7.0	6.5	6.0	5.8	5.3	4.9
最高圧力到達時間			0.067	0.058	0.056	0.055	0.048	0.042
圧力上昇最大速度			154.7	161.7	168.7	168.7	175.8	175.8
圧力上昇平均速度			103.7	112.5	109.0	105.5	109.0	116.0
水　素（空気中濃度 30%）								
最高圧力	7.6	7.4	7.0	6.3	5.9	5.6	5.3	4.6
最高圧力到達時間	0.008	0.0104	0.011	0.012	0.013	0.0135	0.0135	0.013
圧力上昇最大速度	703.1	703.1	625.8	632.8	632.8	689.0	689.0	703.1
圧力上昇平均速度	949.2	703.1	696.1	527.3	457.0	421.9	393.7	358.6
プロパン（空気中濃度 5%）								
最高圧力	7.3	6.9	6.7	6.3	5.9	6.2	5.3	5.1
最高圧力到達時間	0.059	0.058	0.056	0.054	0.048	0.044	0.043	0.041
圧力上昇最大速度	158.2	160.0	175.8	182.8	193.4	196.9	210.9	221.5
圧力上昇平均速度	123.0	119.5	119.5	116.0	123.0	140.6	123.0	123.0

表 6 − 10　燃 焼 熱

物　　質	状態	燃焼熱 [kcal/mol]
14. 無機物質		
水　素	気	68.32
炭素（ダイヤモンド）	固	94.51
炭素（黒鉛）	〃	94.05
一酸化炭素	気	67.64
シアン化水素	〃	158.6
ジシアン	〃	261.9
アンモニア	〃	91.44
いおう（斜方晶形）	固	70.96
二硫化炭素	液	402.7
カルシウム	固	151.8
マグネシウム	〃	143.7
アルミニウム	〃	400.5
鉄	〃	267.1
ニッケル	〃	57.3

表 6 − 11　炭化水素類の各燃焼熱の比較

物　　質	状態	燃焼熱 (25°C, 1atm)			
		H_2O(液), CO_2(気)		H_2O(気), CO_2(気)	
		[kcal/mol]	[cal/g]	[kcal/mol]	[cal/g]
水　素	気	68.32	33 888	57.80	28 670
炭　素	固	94.05	7 831		
一酸化炭素	気	67.64	2 415		
メタン	気	212.80	13 265	191.76	11 954
エタン	〃	372.82	12 390	341.26	11 350
プロパン	〃	530.61	12 034	488.53	11 079
	液*	525.78	[illegible]	484.70	10 993
ノーブタン	気	687.95	[illegible]	635.38	10 932
	液*	682.64	[illegible]	630.25	10 844

(8)　酸素の濃度限度

可燃性物質－空気の混合物を窒素でうすめたとき，火炎を維持するのに役立っている酸素の最小濃度を濃度限度という。

すなわち，燃焼を維持するために必要な最低の酸素濃度である。一般に炭化水素系物質の酸素の濃度限度が１０～１２％（vol）であるのに対し，水素は５％と低い。この酸素の濃度限度は装置のパージや不活性ガス化のときに許容される酸素量の限度を定める値となる。

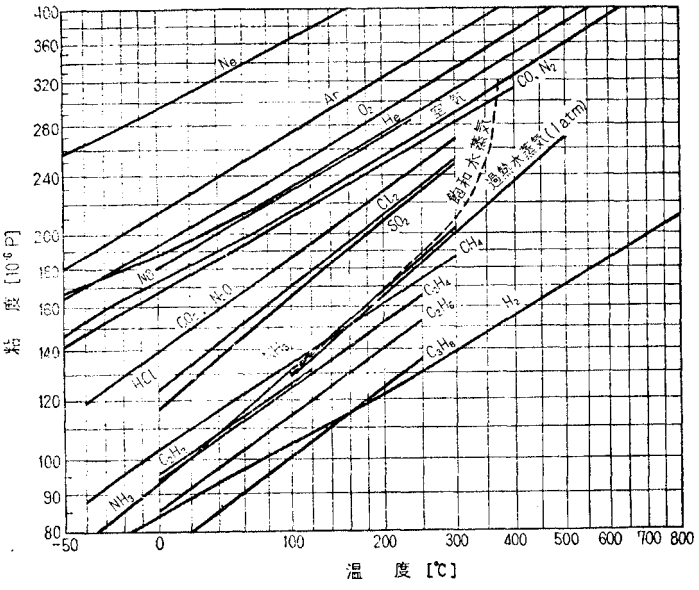
(9)　焔の性質

水素の燃焼温度は高温であるが，プロパン等の炭化水素より輻射熱は小さい。しかも焔は無色に近い。これらの性質から水素の燃焼している焔の検出は困難である。消火の不可能な際の唯一の信頼しうる消火作業は，水素の供給源を遮断することである。

6 − 2 − 2　その他の特性

水素は非常に軽い，粘度の小さい，しかも，空気中における拡散係数の大きな気体である。図 6 − 6 に粘度を，表 6 − 12 に拡散係数をそれぞれ示す。

図 6 － 6　気体の粘度〔1 atm〕



したがって，水素は低い部分に滞留するおそれはないが，狭小の部分を容易に通り抜け，急速に拡散するので，漏洩を起こしやすく，しかも漏洩の発見を遅らせ，あるいは漏洩個所の確認を困難ならしめる可能性がある。表 6 － 1 3 にその他の諸性質を示す。

表 6 − 1 2　2成分系気相の拡散係数（1 atm）

拡散係数 [cm²/sec]
（温度）　[°K]
文　献　（下記）

a: International Critical Tables, 5, 62.
b: Paul, Srivastava: *J. Chem. Phys.*, 35, 1621 (1961).
c: Mueller, Cabill: *J. Chem. Phys.*, 40, 651 (1964).
d: Fuller, Schettler, Giddings: *Ind. Eng. Chem.*, 58 (5), 19 (1966). この文献には他の温度における値も多数出ている.

	Air	Ar	CO	CO_2	D_2	H_2	H_2O	He	Kr	N_2	Ne	NH_3	N_2O	O_2
Air	Air													
Ar		Ar												
CO		0.1880 (295.7) d	CO											
CO_2	0.1420 (276.2) d	0.1652 (317.2) d	0.1520 (296.1) d	CO_2										
D_2	0.5650 (295.8) d	0.5750 (295.8) d	0.5490 (295.7) d	0.4740 (295.7) d	D_2									
H_2	0.611 (273.2) a	0.8280 (287.9) d	0.7430 (295.6) d	0.6650 (298.2) d	1.2400 (288.2) d	H_2								
H_2O	0.2770 (312.6) d			0.2110 (328.6) d		1.0200 (307.3) d	H_2O							
He	0.6242 (276.2) d	0.8090 (323.2) d	0.7020 (295.6) d	0.5780 (323.2) d	1.2500 (295.1) d	1.1320 (298.2) d	1.4140 (498.2) d	He						
Kr		0.1190 (273.0) d							Kr					
N_2		0.1940 (293.0) d	0.2120 (295.8) d	0.1730 (300.0) d	0.5420 (296.8) d	0.7080 (273.0) d	0.3030 (328.6) d	0.7050 (293.0) d		N_2				
Ne		0.2710 (273.0) d				1.150 (303.9) b			0.2230 (273.0) d		Ne			
NH_3	0.2470 (295.1) d	0.2320 (295.1) d	0.2400 (295.1) d		0.6300 (296.8) d	0.7454 (273.0) d		0.8310 (296.6) d		0.2480 (295.1) d		NH_3		
N_2O				0.0531 (194.8) d		0.535 (273.2) a							N_2O	
O_2	0.178 (273.2) a		0.185 (273.2) a	0.139 (273.2) a		0.697 (273.2) a	0.3180 (329.0) d	0.8090 (323.2) d		0.181 (273.2) a				O_2
SF_6			0.0887 (296.8) d		0.3050 (295.7) d	0.3960 (286.2) d						0.1090 (296.6) d		
メタン	0.2190 (289.0) d		0.220 (298.2) c	0.153 (273.2) a		0.7260 (298.0) d	0.3310 (328.8) d	1.0050 (373.0) d		0.216 (298.2) c				
エタン						0.5370 (298.0) d				0.1480 (298.0) d				
エチレン			0.116 (273.2) a			0.486 (273.2) a	0.2330 (328.5) d			0.1630 (291.2) d				
プロパン				0.0863 (298.0) d									0.0850 (298.0) d	
n-ブタン						0.3610 (287.9) d				0.0960 (298.0) d				
イソブタン						0.277 (273.2) a				0.0905 (298.0) d				
n-ヘキサン		0.0663 (288.6) d				0.2900 (288.7) d		0.5740 (417.0) d		0.0757 (288.6) d				0.0753 (288.6) d
2,3-ジメチル		0.0657 (288.9) d				0.3010 (288.8) d				0.0751 (288.7) d				0.0753 (288.4) d
シクロヘキサン		0.0719 (288.9) d				0.3190 (288.5) d				0.0760 (288.6) d				0.0744 (288.6) d
メチルシクロペンタン		0.0731 (287.1) d				0.3180 (288.5) d				0.0760 (288.6) d				0.0742 (287.1) d
n-ヘプタン		0.0658 (303.2) d			0.2180 (303.2) d	0.2830 (303.2) d		0.2650 (303.2) d		0.0740 (303.2) d				
2,4-ジメチルペンタン		0.0655 (303.2) d			0.2240 (303.2) d	0.2970 (303.3) d		0.2630 (303.2) d		0.0744 (303.1) d				
n-オクタン	0.0505 (273.2) a	0.0587 (303.2) d			0.2080 (303.2) d	0.2770 (303.2) d		0.2480 (303.2) d		0.0726 (303.1) d				0.0705 (303.1) d
2,2,4-トリメチルペンタン		0.0599 (303.2) d			0.2120 (303.2) d	0.2920 (303.2) d		0.2530 (303.2) d		0.0713 (303.3) d				0.0705 (303.0) d
n-デカン						0.3060 (364.1) d				0.0841 (363.6) d				
ベンゼン	0.0962 (298.2) d			0.0528 (273.2) a		0.4036 (311.3) d		0.3840 (298.2) d		0.1022 (311.3) d				0.1011 (311.3) d
トルエン	0.0920 (312.6) d	0.071 (273.2) a												
メタノール	0.132 (273.2) a			0.0879 (273.2) a		0.506 (273.2) a		1.0320 (423.2) d						
エタノール	0.1350 (238.2) d			0.0685 (273.2) a		0.375 (273.2) a		0.4940 (298.2) d						
プロパノール	0.0850 (273.2) a			0.0577 (273.2) a		0.315 (273.2) a		0.6760 (423.2) d						
2-プロパノール	0.0990 (299.1) d							0.6770 (423.2) d						
ブタノール	0.0870 (299.1) d			0.0476 (273.2) a		0.2716 (273.2) a		0.5870 (423.2) d						
エチレンオキシド				0.0918 (298.0) d									0.0914 (298.0) d	
ピリジン						0.4370 (317.9) d				0.1068 (317.9) d				0.1050 (318.3) d
ピペリジン						0.4030 (314.7) d				0.0953 (314.9) d				0.0953 (315.0) d
チオフェン						0.4000 (302.2) d				0.0992 (302.1) d				0.0975 (302.1) d
ニトロベンゼン	0.0855 (298.2) d							0.3720 (298.2) d						

表6－13　高圧ガス諸性質表

種類	名称（）内は容器の色*	分子式	臨界温度〔°C〕	臨界圧力〔atm〕	融点〔°C〕	沸点〔°C〕	気体比重（空気＝1）	爆発限界〔vol %〕	発火点〔°C〕	許容濃度〔ppm〕	腐食性	充てん定数**	容器試験圧力〔kg/cm²〕
圧縮ガス	アルゴン	A	−122.4	48.0	−189.2	−185.7	1.379 9				無		温度35°Cにおける最高充てん圧力の5/3倍
	一酸化炭素	CO	−139	34.5	−205.0	192.2	0.976	12.5～74	609	100	無		
	キセノン	Xe		58.0	−112	−108.1					無		
	空気		−140.7	37.2	−213～225	−191.5	1.000 0				無		
	クリプトン	Kr	−63.8	54.3	−157.2	−152.9					無		
	酸素（黒）	O_2	−118.4	50.1	−218	−182.9	1.104 9				無		
	酸化窒素	NO	−93	64	−163.7	−151	1.27				無		
	水素（赤）	H_2	−239.9	12.8	−259	−252	0.069 5	4.0～75	400		無		
	窒素	N_2	−147	33.5	−210.0	−195.8	0.966 9				無		
	ネオン	Ne	−228.7	26.9	−248.6	−245.9					無		
	ヘリウム	He	−267.9	2.2	−272.1	−268.9	0.138 0				無		
	メタン	CH_4	−82.1	45.8	−182.7	−182.7	0.554	5.0～15.0	540		無		
液化ガス	アンモニア（白）	NH_3	132.3	111.3	−77.7	−33.4	0.58	15～28	651	100	有	1.86	37
	亜酸化窒素	N_2O	36.5	71.7	−90.9	−88.5	1.529				無	1.34	200
	亜硫酸ガス	SO_2	157.5	77.8	−15.5	−10.0	2.262 9			5	有	0.80	15
	エタン	C_2H_6	32.3	48.2	−172	−88.6	1.035	3.0～12.4	515		無	2.80	
	エチルアミン	$C_2H_5NH_2$	183	55.5	−83.3	16.7	1.56	3.5～	385	25	有		
	エチレン	C_2H_4	9.2	50.0	−169.5	−103.8	0.975	2.7～36	490		無	3.50	225
	塩化エチル	C_2H_5Cl	187.2	52	−138.5	13.1	2.220 0	3.8～15.4	519	1 000	有		
	塩化水素	HCl	51.4	81.5	−112	−85				5	有	1.67	
	塩化ほう素	BCl_3	178.8	38.2	−107	12.5	1.433 8			1	有		
	塩化ビニル	C_2H_3Cl	156.5	55.2	−159.7	−13.9	2.15	3.6～33		500	有	1.22	13
	ホスゲン	$COCl_2$	182	56	−104	8.3	1.392			1	有		
	ブタン	C_4H_{10}	152.0	37.5	−135	0.56	2.01	1.8～8.4	405		無	2.05	11
	イソブタン	$(CH_3)_3CH$	134.9	36.0	−145	−11.7	2.068	1.8～8.4	460		無		
	1-ブテン	C_4H_8	146.4	39.7	−130	−6.3	1.937	1.6～10	385		無		
	ブタジエン	C_4H_6	152	42.7	−113	−4.4	1.87	2.0～12	420	1 000	無	1.85	12
	ブチレン	C_4H_8	144.7	39.5	−146	−6	1.94	1.8～9.7	323		無	2.00	10
	ふっ化水素	HF	230.2		−92.3	19.4	0.988			3	有		
	ふっ素	F_2	155	25.0	−223	−188				0.1	有		
	フレオン-22	$CHClF_2$	96.4	48.5	−160	−40.8	1.41				無	0.98	35
	プロパン	C_3H_8	96.8	42.0	−189.9	−42.8	1.56	2.1～9.5	450		無	2.35	30
	プロピレン	C_3H_6	91.8	45.6	−185.2	−47.7	1.49	2.4～11	460		無	2.27	36
	メチルエーテル	CH_3OCH_3	126.9	53	−140	−24.9	1.59	3.4～27	350		無	1.67	23
	硫化水素	H_2S	100.4	88.9	−82.9	−60	1.175				有	1.47	65
	塩化メチル	CH_3Cl	143.1	65.9	−97.4	−23.9	1.78	7～	632	20	有		20
	塩素（黄）	Cl_2	144.0	76.1	−100.9	−34.1	1.557			100	有	0.80	26
	二酸化窒素	NO_2	158	100	−9.3	21.3				1	有		
	エチレンオキシド	C_2H_4O	195.8	7.2	−111.3	10.7	1.52	3.6～100	249	5	無	1.30	12
	シアン化水素	HCN	183.5	53	−13.4	25.0	0.96			50	無	1.57	6

6－3　水素の漏洩，酸素混入管理

既に述べたように，分子の小さい水素は非常に洩れやすい物質である。ガス体の水素の洩れは窒素の2倍でメタンとほぼ同じであり，また液体水素の洩れは液化窒素の12倍，液化メタンの5倍である。一方，水素は空気中に急速に拡散する。

1.8 m^3 の液体水素が流れ出た場合，平均，1分間に爆発濃度以下に拡散する。しかも，水素の密度は空気の14分の1である。このように水素は拡散が早く，しかも軽い性質を有するため，漏洩個所を正確につきとめることが困難である。漏洩個所の検出に経験上最も信頼できる方法は，石けん液の如き液状の漏洩検知液を用いた検出装置である。この方法では漏洩を目で確めることができる上に感度も鋭敏で，10^{-4} atm，cc/sec までの小さな洩れまで検出することができる。それ以上に鋭敏な感度を要求される場合，例えば 10^{-6}～10^{-8} atm・cc/sec の範囲では，helium mass spectrometer leak detectorを用いる。

また，低温の装置では，比較的大きな漏洩個所があると，その個所は広い範囲にわたって霜が付着しており，また蒸気が出ているので発見できる。

水素中に，それが酸素単体にせよ，あるいは空気の形をとるにせよ，その混入は爆発の原因となるので除去しなければならない。酸素を含んだ水素ガスは常温で触媒を用いて含有酸素を除去し，さらに低温度における酸素吸収器を使用して酸素の痕跡分を除去する必要がある。なぜならば，液体水素温度で酸素は1 ppm の割合で液体水素に溶解し，この少量の酸素が凝縮したり固化したりして爆発を起こす可能性があるからである。また，液体水素温度ではヘリウム以外のガスはすべて固化する。これらの固化したガスは場所によって，例えばバルブや小孔などに閉塞を起こす。

酸素の検知は，低温における吸収法やガスクロマトグラフを用いる実験室的な分析法その他の方法による。これらの方法によって未然に事故を防止し安全の確保を図らなければならない。

6－4　安全指針

6－4－1　全　般

6－4　安全指針

6－4－1　全　般

最初に述べたように水素に起因する事故中，最も大きなものは火災と爆発である。これらの事故が発生するためには点火源，可燃性物質，酸化剤の三つの要素が必要である。従って，いかなる事情があろうとも，これらの三要素が同時に存在することは許されないのであって，水素を取扱う関係者は常にその危険性を認識し，三要素の検知を厳重にすることが水素に関する安全の原則である。

三要素中，第一の点火源についていえば，水素の場合あらゆる加熱源が点火源となるので充分の注意を必要とする。主なる点火源をあげると，

(i)　裸火……マッチ，たばこの吸がら等

(ii)　静電気放電

(iii)　金属の衝撃による火花および熱

(iv)　ガス又は電気溶接，切断によるスパーク及び溶融金属

(v)　摩擦熱

(vi)　電気スパーク及び熱

などがある。常時，点検を怠ることなくこれらの点火源の存在を未然に防止しなければならない。

静電気放電の防止にはアース配線を完全に実施し，且つこれを日常の点検を行うことが必要で，特に配管　タンクローリー等のアースに注意しなければならない。また，人間のもつ静電気エネルギーが着火の原因になることがあるので，適宜除電するとか，または履物や衣類に考慮を払う等の処置を要する。

その他，止むを得ず修理のため溶接等を行う場合には，予め充分水素をパージして後に実施するのは当然である。

第二の可燃性物質については，水素の安全に関する特性において，また第三の酸化剤については酸素の混入管理においてそれぞれ既に述べたので省略する。

次に，火災発生時の処置について述べる。水素の炎は無色で見えないので消火の際注意を要する。液体水素が大量に空気中に漏洩着火した場合，

直接水をスプレーして消火することは避けなければならない。たとえ水素の炎を消すことに成功しても，水素はなお放出されており，混合ガスが形成されて，余熱等で再爆発の危険がある。元のバルブを締め，延焼を防止すべきである。

二次的な災害としては，先ず水素自体に毒性はないので，特に密閉個所において酸素の欠乏に注意する程度である。また，液体水素が身体に直接付着し，または断熱をしていない機器に触れた場合，身体の組織に火傷を発生する。機械的な災害事故については現状では高圧ガス取締規則等の法規に基ずいて安全対策を講ずるべきであるがここでは省略する。

6－4－2　精製関係

(i)　装置機器を清潔に保つ。特に内部に水分，油，グリース等の混入を防止する。…低温部でバルブ，配管の閉塞事故を起こす。

(ii)　可燃性物質を除去する，脱油。

(iii)　作業台は不燃性材料を用い，油，グリースを付着しない。

(iv)　工具は清潔に保つ，スパークの発生しない工具を使用する。

(v)　作業衣，靴下，手袋等木綿製を着用し，他の作業場で着用するものと区別する。

(vi)　水素の滞留を防止するため換気をする。換気装置は天井につける。

(vii)　容器または密閉個所の水素のパージは予め定めた手順に従って完全に行い。内部のガスを分析して安全を確認する。

(viii)　現状では危険区域を指定し，責任者の発行する許可証をもったもののみの立入を許可する。

(ix)　溶接の如き着火源をもった作業は，設備の外に運搬して実施する。

(x)　漏洩の検出を常時実施する。

(xi)　boil-off gas による圧力上昇にともなう危険を防ぐために，保護装置として安全弁，破裂板，排出用ベント，リリーフ弁を設ける。リリーフ弁は与えられた条件で作動するかどうかを点検する。リリーフ弁，破裂板について漏洩の有無を点検する。

(xii)　正規の基準以上の酸素または炭化水素の存在は即刻責任者に報告す

る。

(xii) 液化水素廃棄ユニットを付属設備としてつけ加える。

6－4－3　貯蔵，輸送関係

(i) 貯槽は建物内に設置せず，その配置並びに設置場所については法規に従う。

(ii) 貯蔵システムおよびガスの取扱いに関する注意を徹底すると共に掲示を行う。

(iii) 貯槽近辺の車輛の通路を明示する。

(iv) 換気をよくし，水素の滞留をさける。

(v) 危険区域を指定する。

(vi) 静電気の蓄積，放電を避けるためアースを完全にする。

(vii) 電気設備は指定の安全基準に合格していることを確認する。

(viii) 溝，ピット，ケーブルダクトを作らない。

(ix) 可燃性物質を周辺に置かない。

(x) 貯槽を防壁で囲む，但しバリケードは事故の場合，燃焼により圧力が上昇して爆発に移行する可能性があるので適当ではない。

(xi) 安全弁，破裂板よりの水素は，窒素でパージされたリリーフシステム内に放出され，スタックから大気中に放出する。
スタックの位置は，万一排出された水素に着火しても装置に影響を及ぼさない場所に設置する。

(xii) 液体水素配管の断熱材不良の場合，空気が配管の表面に凝縮して強い酸化剤となる故，これが支燃性物質と混合して火災や爆発事故を発生するので注意を要する。

(xiii) 計器の補正，安全弁のテスト，破裂板の交換，配管の圧力試験を定期的に実施する必要がある。

(xiv) 地震対策に留意する。

6－4－4　金属水素化物

金属水素化物は今后の開発にまつ新らしい水素供給形態であるが，安全対策として考える場合，次の項目に少なくとも留意すべきであろう。

a) 粉体であるための安全対策，特に製造時，貯蔵時，回収時等の自然発火など，

b) 容器の材質，特に脆性，重量，圧力など。

c) 温度変化による水素ガスの分離特に密閉，圧力上昇，漏洩，空気との接触など。

6－4－5　危険予防対策の基本

以上述べたように，危険予防対策の要諦は，常識的なことではあるが，まず第一にプランニング，基本設計の段階で，起こり得ると考えられるすべての事故に対して万全の策をとるべきであり，そのためには水素の本質を知り，慎重に装置機器の材料を選定し，配置を考慮し，操業条件を設定することが必要である。

第二には，一時的な異状，例えば昇温または昇圧に対してそれが事故につながることなく正常な運転に復しうるような安全システムを設置する必要がある。

第三に，不幸にして事故が発生した場合には，それを局限化して他への波及を防止し，被害を最小限にとどめるための対策を予めたてておく必要がある。そのためには，装置機器間の距離，所要面積，防壁，ブローダウンシステムを考慮し，大災害に至るのを防止すべきである。

勿論，第3段階以降の必要のない措置をとることが最上の対策ではある。

なお，水素エネルギーの日常社会への普及のためには本章で述べた事項を十分に配慮しつつ，関連機器のきびしい研究開発が必要であると同時に，正しい知識について大衆を啓もうすることが同程度に必要であることを強調したい。

6－5　安全工学協会等における成果の概要

当研究所からの再委託先である安全工学協会他3社における成果の概要を次に示す。なお，これらは後日別個にまとめられる予定である。

6－5－1　内外における資料の収集

(1) 法規・基準類

平素の安全についての単独の法令は，現在調査中であるが関連する法規としては国内では高圧ガス取締法，消防法，あるいは労働安全衛生法

がある。

また，国外のものとしては，基準類として米国におけるものヨーロッパにおけるもののうち下記を調査した。

米国におけるものとしてはNASA(米国航空宇宙局)が液体水素について最も多くの研究と実績をもっているため基準類の制定も相当に進んでおり，またNFPA, DOT, CGAなども基準を作成している。ヨーロッパにおいては，西ドイツおよびフランスの両国で最も研究開発が進んでおり一部基準を収集したが英国，オランダ等の実情については今后の調査にまつ。

収集した主な基準としては次のようなものが挙げられる。

1. NASA　Hydrogen Satety Manual (NASA TMX-5245)
2. NBS　Satety Instruction and Safety Guide for Handling Gaseous and Liguid Hydrogen at the Boulder Laboratory
3. NFPA　Standard for Gaseous Hydrogen Systems at Consumer Sites(NFPA NO, 50A-1973)
4. NFPA　Standard for Liguefied Hydrogen Systems at Consumer Sites (NFPA No 50B-1973)
5. L'Air Liquide　Guide de Sécurité Hydrogène
6. L'Air Liquide　Guide de Sécurite Hydrogène Liguide

(2) 企業内基準

水素を取扱う私企業においては，社内用として取扱い基準類を作成しているものがある。

これ等を対称に調査し水素および水素をふくむ高圧ガスに関する基準類を現在までに9点収集した。

主なものは次のとおりである。

A社……作業基準

B社……水素ガス納入作業基準

C社……水素ガス製造設備危害予防規定

D社……水素ガスの安全な取扱い

(3) 災害事例

水素に関する災害事例を調査し，国内のもの43件，国外のもの44件を収集し，なお調査収集作業を継続中である。収集した災害事例について現在とりまとめ中である。

(4) 文献類

水素に関する基礎的資料として水素の安全に関する文献類を調査，360件をリストアップし，現在までに国内のもの6件，国外のもの89件を収集した。現在収集作業を継続しながら収集したものを整理中である。

6－5－2 水素の液化過程における微量不純物の挙動

大量水素使用時には，水素の液化技術が必要となるものと思われる。欧米諸国に比べると我国の水素液化・貯蔵・移送技術は大幅に遅れている。従って早急に液体水素関連技術の確立を目指す必要がある。

(1) 液化プラント

Simple linde，Claude，He 冷凍による水素液化方式の大型化に対する利点と欠点をあげ，世界中の大型水素液化機・貯蔵タンク・移送システムの現状を調べた。大型液化機は Claude 方式，貯蔵タンクは球型 evacuated perlite 断熱方式が主流である。

(2) 液化過程における不純物

原料水素ガス中の主要不純物の種類，固化温度と各液化サイクル内の温度分布より，液化機のどの部分に固化付着するかを予測した。J－T弁部付近では酸素のみが付着すると考えられる。液化機の危険性の1つは，水素と酸化剤が反応し爆発することであるから，液化機内の酸素の挙動が重要となる。従って液体水素中への酸素の溶解度を調査し，最大許容濃度を把握した。この値は 0.1～1.0 ppm 程度と推定されるが，この値から実際運転の際の値を推測することはできず，実験の必要性が感じられる。

(3) 水素―酸素反応

液化機内で起こると予測される如き，多量水素―微量酸素の反応例は

見あたらず，低温での化学量論組成比及びそれからの多少のずれの組成比の実験データから，低温での水素—酸素反応の現象を調査した。低温でも常温とほぼ同じ反応挙動を示し，最小発火エネルギーも小さく発火し易いことがわかった。従ってJ－T弁部での衝撃力によっても発火する可能性は存在すると思われる。

(4) 液化機本体内以外での危険性

貯蔵タンク・圧縮機・配管類における危険性を概観したが断熱が破れた時に酸素rich の固体空気が生成され，これが何らかの原因で水素と反応すると危険となる。

圧縮機では潤滑油中の溶存酸素が大きな問題となる。

(5) まとめ

液化過程における不純物として，とくに問題となる物質は酸素でありこれがJ－T弁付近で固化付着した場合の現象把握は重要である。このことに関しては，文献・調査からはわからず，実験の必要性が感じられる。

6－5－3 水素の低温貯蔵，精製段階の安全のための計測制御システム

(1) はじめに

従来我国では，一部の実験室的使用を除いて液体水素の取扱いや消費の実績は全くない。将来の水素エネルギーシステムの具現化のために必要不可欠の保安技術に関して本調査では，水素の低温貯蔵・液状での取扱い，精製関係の文献収集を中心にした調査によりこの方面に関しての内外の現状把握と問題点の摘出を行った。

本調査では保安や防災のための安全技術のみに止まらず，水素の取扱い一般が安全に対する観念を高めるという意味から広く関連文献を調査し問題点の摘出を行った。

従来水素関係の文献としては米国のNASA計画に関連するものが多く，又大量の液体の取扱い等実際面に関するものが多くを占めている。従ってこれ等を中心とした各文献より，液体貯蔵（輸送用貯槽も含む）や精製法に関してレビューしまとめるとともに，水素の安全廃棄法や防災関

係事項および計測関係事項の摘出を行った。同時に安全一般に特に関係の深い水素の物性や装置材料，災害事例等に関しても調査した結果をまとめた。

(2) 水素の物性

水素の化学的，物理的特性を記しその危険性排除対策に資すると共に一般的物性データを添付した。

(3) 液体水素の貯蔵法

米国での例によって，液体水素貯槽の現状を調査し，低温の断熱法とその設計施工に際しての安全注意事項を指摘した。断熱法は紛末真空断熱と積層断熱法を中心にし、他の方法についても触れた。オルソ→パラ変換熱による液体水素の蒸発も安全問題として重要であるのでこれに触れ、最後に貯槽の形式を概観した。

(4) 水素の精製法

水素中に多種類の不純物を含み，大規模精製に適するPSA法，更に高純度の精製に適する低温吸着法（液体窒素温度），又高純度だが比較的小規模に適するパラジウムを使った隔膜透過法の各精製法の特徴を比較した。他に触媒法等にも触れた。

(5) 液体水素の計測法

低温の温度計測としては金属抵抗体，半導体抵抗体，熱電対等が使用される。これ等の感度特性を比較し，貯槽内でのセンサーの取付法について例を示した。圧力はブルドン管ゲージ，ストレインゲージで計測される。流量計測はタービン式流量計や差圧流量計で行われる。

液面の計測法はキャパシタンス法，差圧計法，光学的方法，カーボン抵抗体法，その他にも2，3の方法があり，これらを概説した。

(6) 装置材料および低温材料

鉄鋼材料については水素，低温ぜい性について特記し，その他の非金属材料についても触れ，水素をプロセス流体とする装置の材料の使用時の安全性について考察した。

(7) 液体水素取扱いに関する安全対策

下記の各項目について，液体水素の取扱いにおける安全対策事項を詳述した。

(i)保安距離―貯槽間，または貯槽と他の建家との間の保安距離は水素が燃焼したときに放射されるエネルギー強度，爆風の強さ等を考慮し，周囲建造物の種類と液体水素に応じて決められる。数件の文献を比較したが，必ずしも同じ値ではない。

(ii)電気設備― 一般的安全対策は今日では可成り規格化されている。水素ガスも対象とされている。「工場電気設備防爆指針」に準じて安全対策事項を記述した。

(iii)建家と換気―水素ガスの物性を考慮して，望ましい建家の形状換気速度が示される。モーター室，制御室についても論じている。

(iv)配管―主として熱収縮が問題になる。

(v)継手―熱収縮と漏洩に注意が必要である。

(vi)バルブ―熱収縮と漏洩について検討している。

(vii)液体水素用ポンプ―軸シールとベアリングが中心問題である。水素の潤滑能が小さいことによる機械的損耗が論じられる。

(viii)消火設備―水素の大量火災そのものに対処できる消火法は現在のところない，従って延焼を防ぐことを第一として消火法一般について概観する。水素火災の検知器についても触れた。

(ix)排ガス処理法―排ガスの処理法は燃焼法と稀釈法の二つに大別される。燃焼法のうちフレヤスタックは設備が簡単であるが，処理速度に制限がある。大量処理にはバーンポンドと呼ばれる方法が開発されている。稀釈法は比較的小規模廃気に採用される。ベントスタックとガスモーター法がある。

(x) LH_2 の蒸発と燃焼―液体水素が地表にこぼれた場合の蒸発と燃焼の状態について実験例を示す。

(xi) LH_2 中の不純物検出―爆発の原因ともなる酸素や炭化水素について記す。

(xii)初充塡―貯槽への液体水素の初充塡時の二つの注意事項，

一つは急速冷却に伴う変型，破損を起さぬこと，もう一つは不活性ガス置換を行って爆発混合物を形成しないようにすることについて記す。

(xiii) 作業員と安全—作業員教育，着衣，凍傷，窒息等，作業員の安全を守るための注意事項を述べた。

(xiv) 漏洩—水素の漏洩検知法，漏洩対策について略述した。

(xv) 自然災害—液体水素の特性を考慮しつつ耐地震対策について考察した。

(8) 災害事例

液体水素貯槽設備の事故例3件，ガス水素による水素化プロセスに関するもの2件を収集し，その事故原因と対策について考察した。

(9) 引用文献およびその他有用文献

合計150件ほどを収録した。

6－5－4 水素の流通消費プロセスにおける保安技術

(1) 水素ガス工業における流通・消費技術の実情調査

日本をはじめ欧米各国における現状について調査した。我国における工業用市販水素の消費量は年間7～8千万m^3程度であってそれらは圧縮水素の状態で容器もしくはパイプライン輸送されている。これらガス輸送に関する技術については欧米各国に比して大した差異はないが，ただパイプライン輸送のスケールにおいてかなり遜色がみられる。例えば西独のHuls社では1938年から大規模なパイプライン輸送を行っており，現在，延長200kmを超えるネットワークにより25kg/cm^2のガス圧でもってmax，2万m^3/Hの水素ガスを供給している。

技術的にみて問題点が多いと思われる液化水素は，工業用としてではなく宇宙開発あるいは，高エネルギー物理研究における必要性から発展してきたので，特にアメリカにおいて豊富な実例をみることができる。アメリカの水素液化プラントの現勢は，主なものだけ取りあげてみても12ケ所あり，合計の液化能力は200トン/日を超える。この中には世界最大の液化能力60トン/日を有するものも含まれているが，宇宙開発計画の退潮から休止しているプラントが多く，現在の実際の液化量は約100トン/日程度となっている。この半量が宇宙開発用に，残る半量が

一般工業用に消費されている。後者の用途は我国におけるガス需要と同様で，ガラス，弱電，金属，食品，薬品向け等に利用されている。従ってトレーラーや貨車による陸上輸送はごくポピュラーなものとなっており，同時に装置技術や取扱いマニュアル等も出来上っている，保安の点からみれば，漏洩事故防止技術や漏洩事故による爆発，火災，災害防止技術についての配慮もなされているが，抜本的な工夫は見当らない。我国の国情（道路事情，人口密度，工場立地等）の特殊性や，ひいては水素の民生利用という点を考えれば，よりきめ細かな保安技術を付加する必要があると結論される。

(2) ガス水素，低温液化水素および金属水素化物の基本的物性調査

各々の状態にある水素の物理的・化学的・生物的性質についてデータの収集・整理を行なうことにより，保安上考えられる多くの問題点を摘出し，検討を加えた。

ガスおよび液化水素については爆発性，燃焼性を中心に，熱力学的性質，オルソ－パラ変換の問題等について調査し，一通りの物性リストを作成した。金属水素化物については主にランタン・ニッケル系のものについて特性を調査した。結論として，水素はガスであれ，液状であれ，非常に漏れて拡散しやすいこと，着火エネルギーが小さいこと，可燃範囲が広いこと，火炎が目に見えないこと等が保安上特記すべき点といえる。

(3) 水素の爆発・火災災害の危険性研究

上記の如く水素ガスは保安上厄介な問題点を多く含んでいる。これに対し，水素の系に使用される装置機器の材料・構造あるいは取扱い技術の不備からくる漏洩の危険性ならびに漏洩（噴出）した場合の着火のメカニズム，そして燃焼・爆発のメカニズムとこれによってもたらされる災害の種類と大きさ等について調査した。とりわけ問題としたのは液化水素が漏洩した場合にみられる一連の現象である，これは主にアメリカにおける実験例を参考とした。結局のところ液化水素が地面にこぼれたときは蒸発速度が大きいため，ガス水素の漏洩と同程度に危険であって

ただ爆発の強度は水素－空気混合気体の存在する空間が閉空間か，開放空間がによって大きな差がある。一例として閉空間において爆轟波圧力は20気圧にもなることが知られている。

(4) 水素に関する事故実例の調査

我々が研究を進めていく上で，過去の事故実例について再調査することは大いに役立つ。国内における事故例としては水素ガスホルダーとか圧縮水素容器に関するものがほとんどである。特に後者については材料の劣化あるいは乱暴な取扱いによる容器の破損，ならびに輸送中の交通事故による容器破損が大半を占めている。

液化水素に関する事故例としては，1965年のＭＩＴの事故の様に容器材料の脆性破損の例もあるが，多くは不十分な置換あるいは逆拡散による可燃性混合物の生成といったいわば不注意によるもので，装置保安を十分にすれば防げたであろうと思われる。

(5) 水素の安全な取扱い方法・技術の調査

特に液体水素について，現在採用されている具体的方法について調査した。大まかな分類としては，当然のことながら漏らさない方法があげられ，次いで漏洩水素の処理（例えば換気や希釈）方法，ボイルオフガスの廃棄（例えば大気放出や燃焼）方法，系に対する空気の逆拡散防止方法，発火源（衝撃スパーク，電気スパーク，火炎，等）の除去，落雷対策，火炎抑制方法，爆発抑制方法等について検討した。

(6) 漏洩検知あるいは漏洩予知方法技術に関する調査

漏洩検知の方法として，漏洩した水素について検知器を用いてする方法と，漏洩が生じた場合の系の圧力・流量の変化を信号として取り出し処理する方法とに分類できる，漏洩予知の問題は，いわば容器（装置）の破壊予知の問題とも考えられ，アコースティックエミッションの技術に期待がもたれるが，実用化するまでには程遠い状況である。

(7) 取締法規　条令　指導要項　自主規準等に関する調査

高圧ガスとしての水素について国内の取締法規を中心に一部の水素メーカーの自主規準，危害予防規程を調査した。またアメリカのNFPA規

準 'Gaseous Hydrogen Systems'(NFPA No50A 1973)も参考にした。

液化水素については同じくNFPA(No50B 1973)の 'Liquid Hydrogen Systems'をベースとしてNASAの 'Hydrogen SaFety Manual' および西独の基準類も含めて検討した。液化水素貯蔵タンクの容量と保安距離との関係について基準が定められている。

(8) 上記(1)～(7)について水素と類似性の大きい物質に対する調査

LNG LEG等について一通りの調査を行い，水素との比較検討を行った。調査結果をストレートに水素の保安に反映することは困難だが，比較することにおいて水素個有の危険性あるいは安全性といったものの認識に役立っている。

§7　水素の精製・貯蔵・輸送システム

7－1　考え方

(1)　製造と利用との関係

本報告書で対象としている水素の精製・貯蔵・輸送システムとは，水素の精製，加圧，液化，金属水素化物（以后MH），液化のための低温精製，ガス体・液体・MHの形態での輸送・貯蔵・分配，ガス体における減圧，液体におけるボイル・オフ又は積極的な気化又は再液化，MHにおける水素脱離などが含まれている。

日本の将来のエネルギーを論ずるトータル・エネルギー・システムにおいては，そのサブ・システムとして水素の製造から利用までを含む水素エネルギーシステムがあり，更にその下位のサブ・システムの一つとして水素の精製・貯蔵・輸送システム（以下PSTシステム Purification, Storage, and Transportation System）が位置している。

これらのサブ・システム群に関する研究がサンシャイン計画として昭和49年度から同時にスタートしたために入出力データを現時点で評価することが出来ないこと，およびPSTシステムが特に製造と利用を連結するシステムであってそのような他のサブ・システムとの接点が複雑であることから，PSTシステムの定量的検討乃至は評価を明確にするために本報告書では製造，利用の一部についての前提条件を種々の仮定により設定した。

(2)　電力との関係

システムの最適化を行なう場合には，その構成につき種々の代替案を提示する必要がある。この場合，PSTシステムに限ってみても水素と他のエネルギーとの代替たとえば水素と天然ガスと電力と……のトータル・システム的見地からの代替率なるものが検討されなければならないし，そのためにはそれぞれの経済的環境的評価を行なう基準なり，各構成要素の信頼性データなりがあきらかにされた上でトータル・システムにフィード・バックされる必要がある。

この異種エネルギー間の代替率はトータル・エネルギー・システムからの外生としてあたえられるものであると一応割切るとしても，2次エネルギーである水素のPSTシステムに於ては電力との比較・検討が不可欠である。従ってこれに附随する水素→電力の変換（たとえば燃料電池）又は電力→水素変換（たとえば水の電気分解）を水素のPSTシステムの構成要素の一つとし

て取り上げざるを得ない。

(3) 代替案の限定

水素自身に関する代替案としては，精製は大体共通部分であっても，ガス体，液体，MHそれぞれと貯蔵，輸送，分配との組み合せが考えられ，それらがすべて代替案となりうる。

しかしながら，現状技術の水準，研究，開発による将来技術の水準の相違およびその利用規模，利用形態の相違により，その代替案は限定されるであろう。

以上を念頭においた上でここでは，まず水素PSTシステムの基本構成を示し，それらの代替案，問題点，システムの評価を述べ，最後に参考モデル例などを記載した。

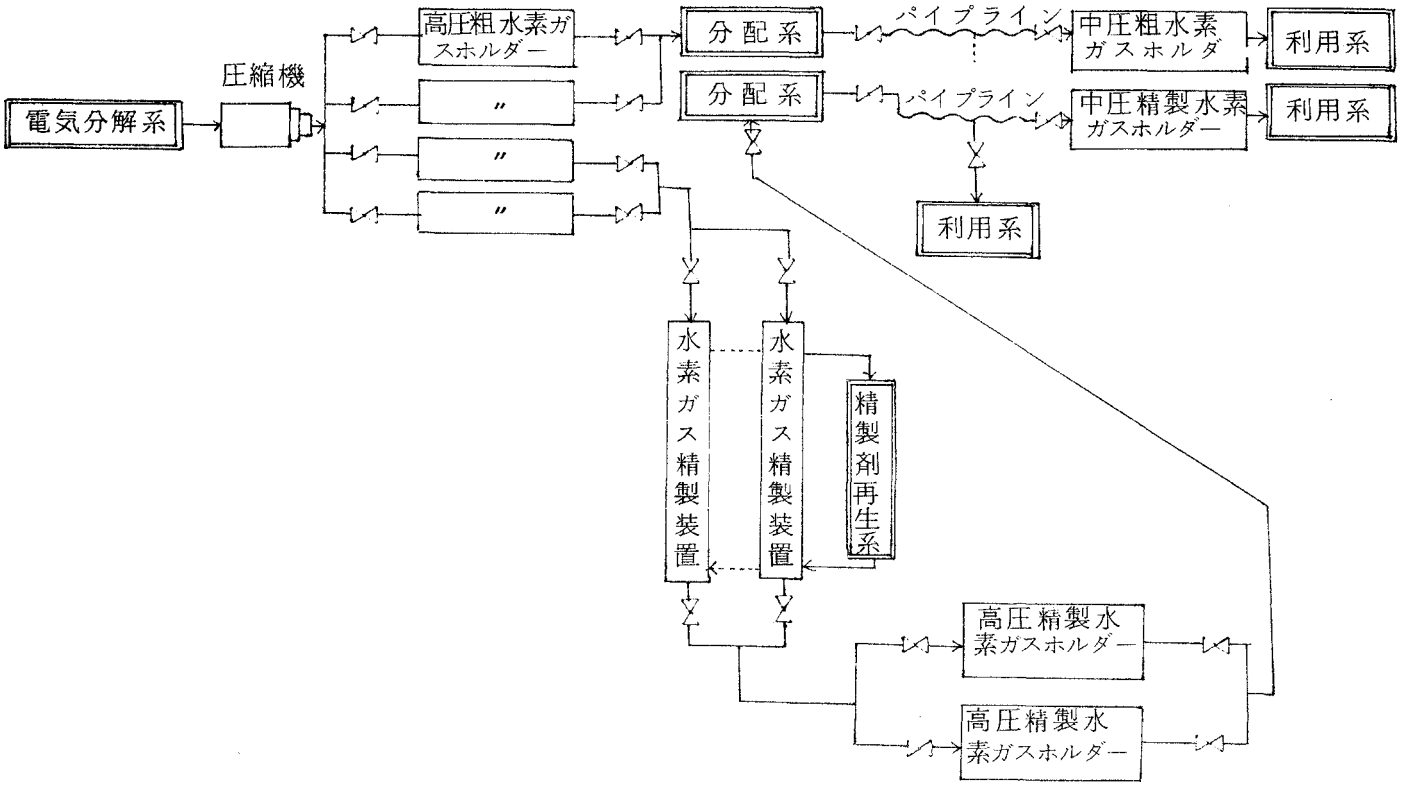
7－2 水素精製・貯蔵・輸送システムの基本構成

形態別の水素PSTシステムの基本構成を概念的にまとめて次に示す。

7－2－1 水素ガス系

図7－1に示すようにたとえば水の電気分解により得られた粗水素ガスは，まず圧縮機で加圧され，高圧粗水素ガスとして高圧粗水素ガスホルダーに貯蔵される。

図7－1 水素ガス系PSTシステムの基本構成



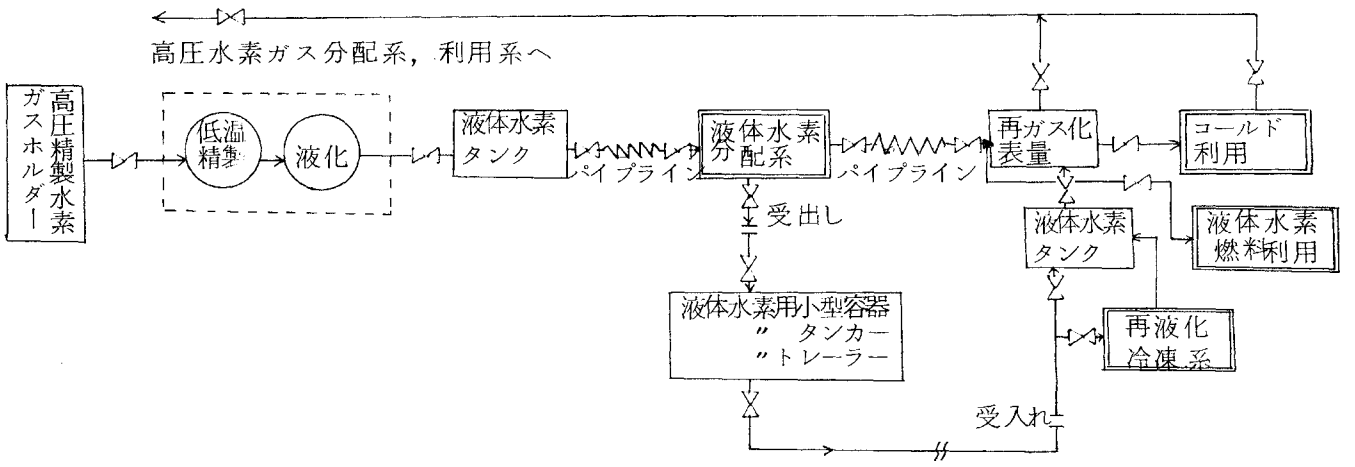
この一部は内部に粗水素ガス系と精製水素ガス系とを別個にそなえた高圧水素ガス分配系を経由して分配され，高圧パイプラインで輸送され，更にその一部は分岐してそのまま利用系に供され，或いは中圧粗水素ガスホルダーに貯蔵される。中圧粗水素ガスホルダーからは，必要に応じ利用系に輸送される。一方高圧粗水素ガスホルダーから水素ガス精製装置へ流入された水素ガスは，ここで精製され高圧精製水素ガスホルダーに貯蔵される。精製装置には精製剤再生系が附帯しており，精製剤は交互に再生され，基使用される。高圧精製水素ガスホルダーからの水素ガスは，前記の高圧水素ガス分配系を経由して分配され，パイプラインで輸送され，中圧精製ガスホルダーに貯蔵され，利用系に供される。

それぞれの装置，ホルダー等は安全制御装置により自動的に監視され，万全な保安体制の下に稼動される。この方式は製造装置に直結したPSTシステムに適する他に，比較的現有技術が利用しうるので安全性という見地から利用末端への分配にも適している。

7－2－2　液体水素系

高圧精製水素ガスホルダーからの水素ガスの一部は，図7－2のフローのように，液化装置へ送られる。ここではまず，低温精製により高純度の水素ガスとなり，次いで液化機により液体水素となり，液体水素タンクに貯蔵される。ここからパイプラインを通じて液体水素分配系へ送られ，一部は受け出し設備を経て液体水素用小型容器，液体水素用タンカー，液体水素用トレーラーに分配され，それぞれ目的地へ輸送される。目的地に到

図7－2　液体水素系PSTシステムの基本構成



着した液体水素は，それぞれの容器から受け入れ設備を経て気体として利用する場合は再ガス化装置に送られて，液体水素分配系から直接パイプラインを経由して送られて来た液体水素も同様に再ガス化される。
再ガス化時には潜熱によるコールド利用が行なわれ，ガス化した水素ガスはそれぞれ高圧水素ガス分配系利用系へ送られる。

一方，パイプライン又は受入れ設備からの液体水素をそのまま燃料（自動車，航空機など）に用いるための液体水素燃料利用系も必要となる。

受け入れ設備又はパイプラインからの液体水素は一部が気化（いわゆるボイル・オフ）した水素ガスを随伴しているのでこれは分離されたのち再液化冷凍系で再液化され，液体水素タンクに貯蔵される。この再液化冷凍系には，予冷用，パージ用の液体窒素が附帯される場合もある。

液体水素タンク，パイプライン等は真空，パーライト断熱などが施され，真空系破裂，リーク等による危険を回避する安全制御装置により自動的に監視される。この方式は大量水素の貯蔵，トレーラー輸送に適していると考えられるが，その他に極低温送電との組み合せによる長距離パイプライン輸送の可能性もある。

7－2－3　金属水素化物系

高圧水素ガス分配系からの一部水素ガスは，水素化物常温貯蔵装置に送られる。ここではTi系などの反応基材が充填されており，これに水素が吸着・反応して金属水素化物となり貯蔵される。ここには図7－3のフローのように反応熱を除去するための冷却装置が附帯しており，反応終了後の本装置はトレーラーなどで輸送され，目的地において加熱装置で加熱され

図7－3　金属水素化物系PSTシステムの基本構成

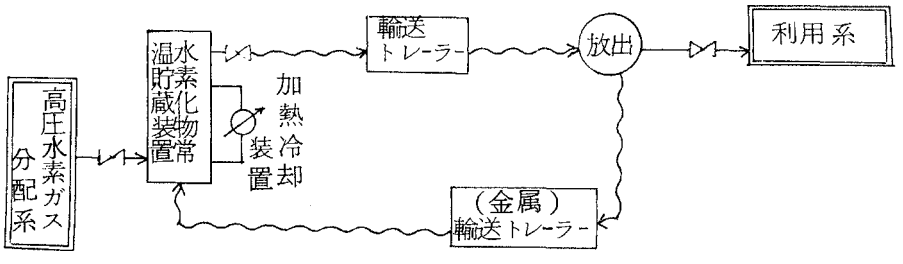
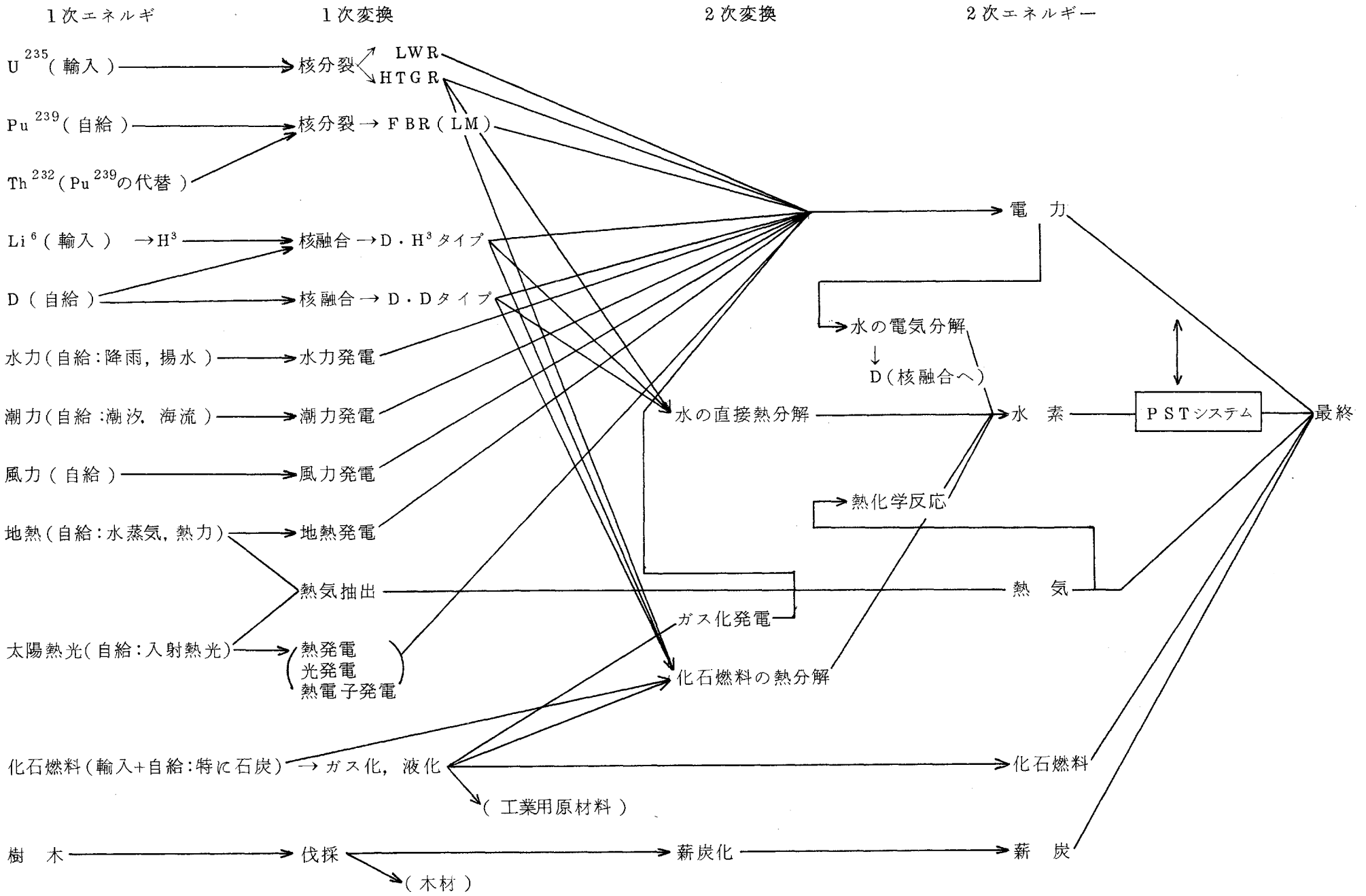


図７－４　１次エネルギーから２次エネルギー製造の概念的フロー



つつ水素を放出しこれを利用系に供すると共に，自身は金属にもどり再度吸着反応に供される。

この方式は比較的小型の末端利用者側の貯蔵に適しており，この補填の際に図７－３の巡回輸送トレーラーを用い，トレーラーでの放出の為の加熱と末端側のMH化の為の冷却を有効に熱交換する手段などが考えられる。

更に液体水素貯蔵タンクからのボイル・オフした水素ガスを補取するためにMH化する場合や，緊急時の放出水素ガスの貯蔵，緊急時用燃料としての貯蔵などにも適しているものと考えられる。

７－３　水素の製造から利用までにおける精製・貯蔵・輸送システムの位置ずけ

７－３－１　エネルギー基地と中間基地

原子力，水力，潮力，風力，地熱，太陽熱光，化石燃料等の１次エネルギーから第１次変換，第２次変換を行なって電力，水素等の２次エネルギーを製造する概念的フローを図７－４に示した。図７－４におけるPSTシステムは電力，水素，最終利用の中間に位置し，これらを模型的に示すと図７－５のようになる。すなわちエネルギー基地（集中製造プラント基地）から長距離輸送されて中間基地に至り，中間基地間の輸送（融通）を行なうと共に，たとえば100万人都市を単位とする２次中間基地１０ケ所程度に分配される。２次中間基地では，図７－５にみられるように更に１０万人程度の分配センターに分配される。

図７－５　製造とＰＳＴシステムとの関連模型

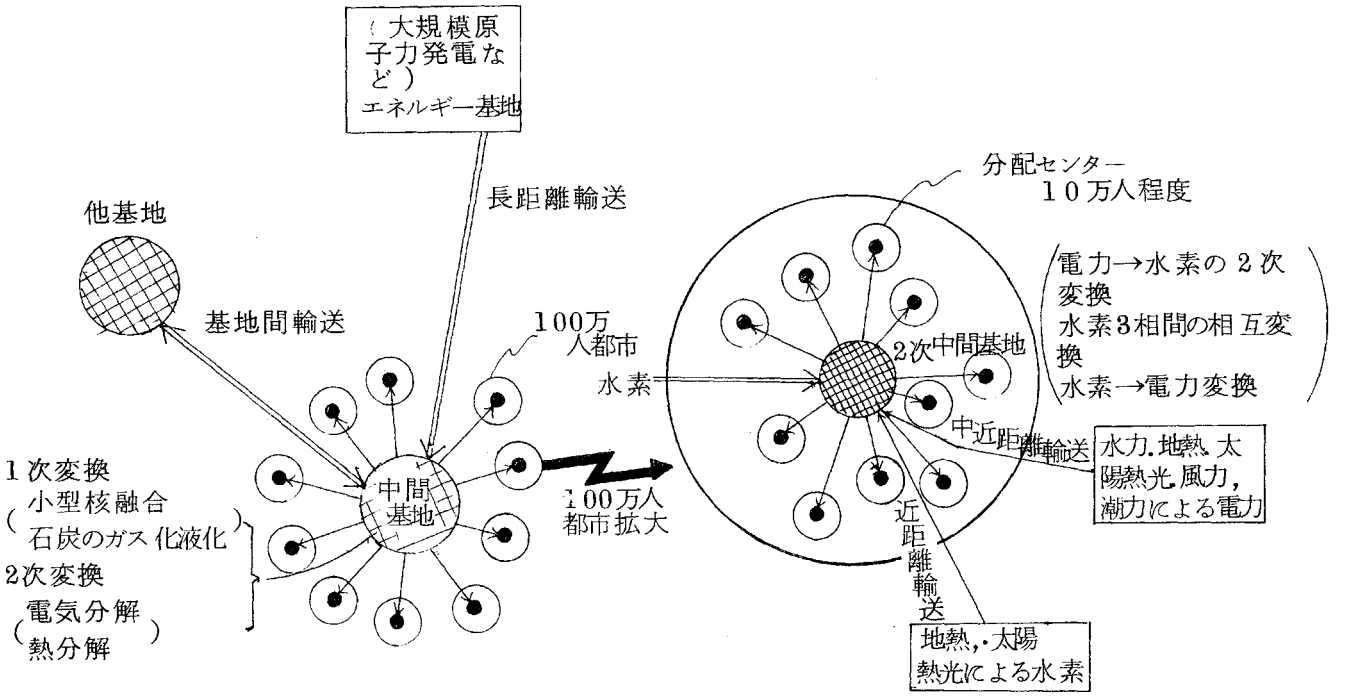


図７－５におけるエネルギー基地では勿論原子力を中心とするような大規模な製造プラントが集中するが，中間基地，２次中間基地，分配センターでも貯蔵，輸送，分配の他に，その規模に応じた製造，変換が行なわれる。

たとえば，中間基地では，小型核融合，石炭のガス化液化などが１次変換として行なわれ，２次変換である電気分解，熱分解も行なわれる。又，２次中間基地では，中間基地からの輸送の他に電力と水素の２次変換，素３相の間の相互変換，水素から燃料電池による電力への変換が行なわれ，この２次中間基地へは更に近郊の水力発電による電力の中距離輸送，地熱，太陽熱光，風力．潮力による電力の近距離輸送，地熱，太陽熱光からの熱化学反応による水素の近距離輸送などが行われうるものと思われる。

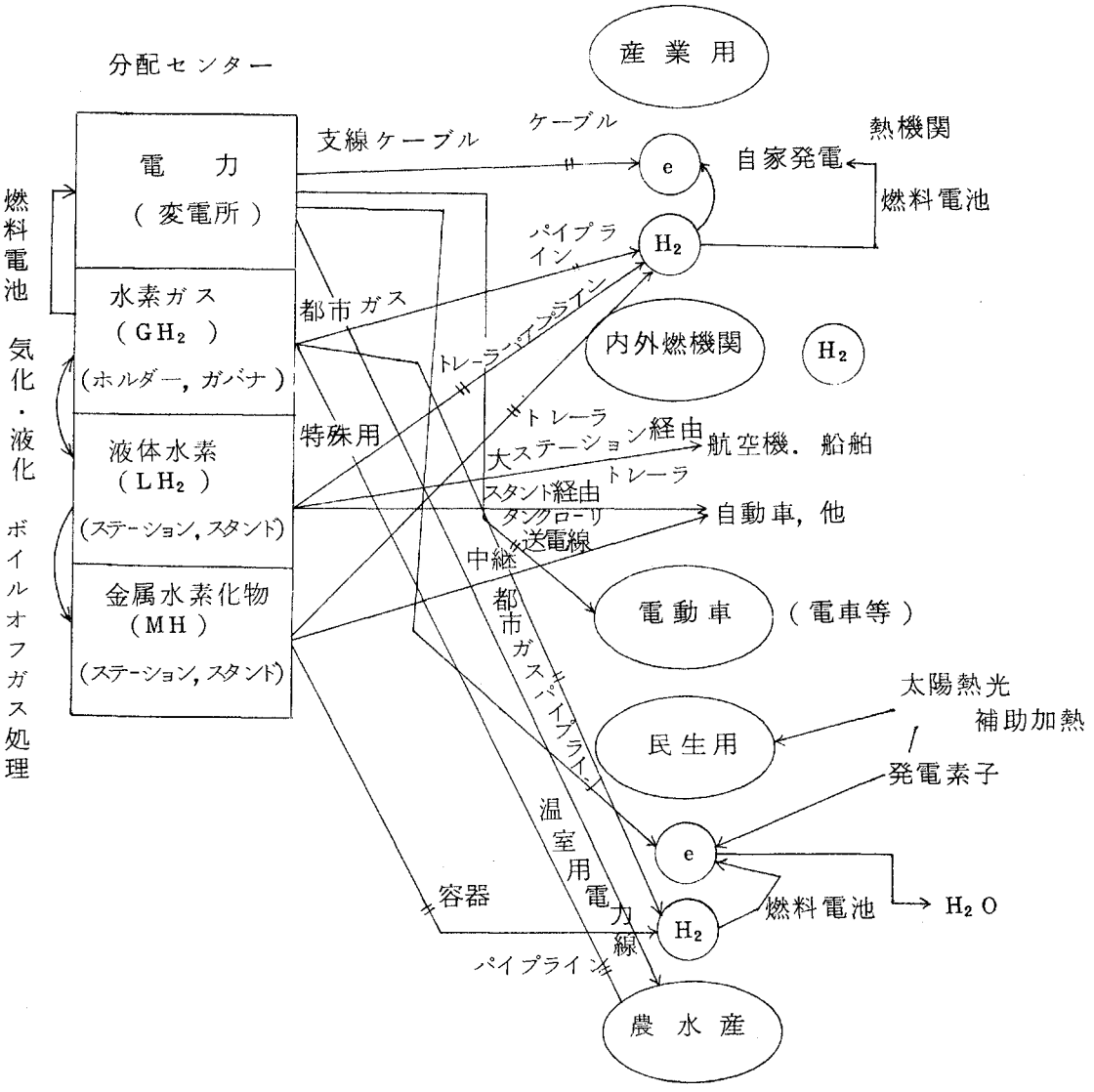
７－３－２　分配センターと最終利用

最終利用はPSTシステムについていえば図７－６のようになるものと予想される。すなわち，分配センターでは電力，水素ガス，液体水素，ＭＨの形で貯蔵され，一部が燃料電池，気化・液化，ボイルオフガス処理など

で相互に変換されながら，最終利用の形態の相違によって異なった手段により輸送される。

なお，ここでは産業用，内外燃機関，電動車，民生車，農水産用にわけ電力を"e"，水素を"H_2"で表示してあり，又末端利用者側での変換の一部も表示した。更に各末端部には図示していないが，産業用，民生用（病院，家庭）などの末端緊急用エネルギー・ストレージが必要であると思われる。

図７－６　分配センターから末端利用までの概念的フロー



7－4　システム構成上の一般的な検討項目

前項で述べたエネルギー基地，中間基地，分配センターなどにおけるシステム構成上の一般的な要検討項目は次の通りである。

7－4－1　エネルギー基地，中間基地における水素－電力の製造，変換，貯蔵システム

①原子力と石炭（短期的には石油も含める）の使用の割合

②原子力で直接水素を作るかどうか（熱分解の効率，コスト，プラント化の問題

③発電および水素製造プラント規模・基数（特に経済性，信頼性，安全性の面を重視）

④高圧送電プラント（DC－AC変換他）

⑤水素精製・液化・貯蔵のプラント規模・基数

精製方式・精製材料・精製サイクル
液化サイクル，液化装置ハードウェア，液化システム
貯蔵容器材料，貯蔵システム
低温測定，制御，要素機器，材料
→ 信頼性 / 安全性 / コスト

⑥MHプラント規模と基数（MH用メタルベース，ポロシティ，MH結合・分離方式）

⑦水素ガス－液体水素－MH－電力相互変換プラント規模・基数（システム制御，AC－DC変換電圧調整）

7－4－2　中間基地間および分配センターへの輸送システム

①中間基地又は分配センターの規模・配置の設定（輸送距離，流量の計算と併せて検討）

②水素ガス・パイプライン配送の可否，および水素ガス圧力（耐震安全性，人口過密問題と関連）

③水素ガス・パイプライン配送システム設計手法と問題点（材料強度，機器，制御，信頼性，安全性，コスト）

④液体水素輸送システム設計手法と問題点

パイプライン－電力ケーブルとのコモンコンジット
（低温送電，超電導送電を含む）

バッチ
- トレーラー
- 専用道路，専用鉄道

⑤液体水素輸送システムの信頼性，安全性

- 急速熱侵入時の安全性（リリーフシステム）
- パイプライン輸送における耐震問題
- 各種故障時の対策

⑥ＭＨ輸送システム設計手法と問題点

７－４－３　分配センターにおける水素－電力の貯蔵・変換システム

①水素貯蔵装置の規模・基数

②水素ガス－液体水素－ＭＨの相互変換方式

③液体水素蒸発分の再液化の適否

④貯蔵装置の設計手法と問題点

⑤水素－電力変換方式

⑥システム制御方式，信頼性と安全性

７－４－４　末端分配システム

①末端需要家への分配の具体的方法と安全対策（リーク等）

②経済性（末端需要価格の健全性）

Ｍ ③液体水素とMHとの相補・競合性（経済性，安全性，技術レベル等のエネルギーとしての評価）

７－５　システム代替案の構成と個々の検討項目

７－５－１　システム代替案の基本形

エネルギー基地，中間基地，２次中間基地，分配センター，末端分配までの，それぞれについての代替案の基本形を次に示す。これらは，基本形であるので，より複雑な組み合せは省略してある。

(1)エネルギー・基地，中間基地における水素－電力の生産，変換，貯蔵システム

モデルＡ：原子力－石炭系とし，石炭（短期的には石油も含める）→水素，原子力→水素

原子力－電力から構成される。貯蔵はいずれも液体水素を主体とし水素↔電力間の相互変換を自由とする。

モデルB：原子力系のみからなるものとし，原子力→水素，原子力→電力から構成される。貯蔵は液体水素を主体とし水素↔電力間の相互変換を自由とする。

モデルC：石炭系のみからなるものとし，石炭→水素，原子力→電力から構成される。貯蔵は液体水素を主体とし水素↔電力間の相互変換を自由とする。

モデルD：2次基地の如く，水素と電力の供給をうけそれらの相互変換のみから構成される系がある。貯蔵は液体水素，水素ガスを主体とし，MHを従とする。

なお，トータル・エネルギー・システムから見れば，水素を使用しないシステム，すなわち，原子力→電気，石炭→電気＋石炭→オイル，石炭→メタン＋石炭→電気，原子力→電気＋石炭→オイルなどがあり，これらは水素エネルギー・システムの対照案として考えることが出来る。

(2) 中間基地間および分配センターへの輸送システム

モデルA：電力－液体水素パイプライン系（長，近距離用で，コモンコンジットを含む）

モデルB：電力－水素ガス・パイプライン系（長，中，近距離用）

モデルC：電力－液体水素バッチ系（長距離用ではタンカー，中距離用ではトレーラー，バルジを含む）

(3) 分配センターにおける水素－電力の貯蔵，変換システム

モデルA：液体水素貯蔵，電力への変換系

モデルB：水素ガス貯蔵，電力への変換系

モデルC：水素ガス貯蔵，水素ガス→液体水素変換，液体水素貯蔵，電力への変換系

モデルD：A，B，CにそれぞれMHを付加した系

なお，ここでは電力→水素への変換は行なわれないとした。

(4) 末端分配システム

モデルA：自動車等の燃料は液体水素，他の水素は水素ガス主体とし，前者はバッチ，後者はライン分配，電力はケーブル分配（地上又は地下）とする。

モデルB：自動車等の燃料はMH，その他はモデルAと同様とする。

モデルC：A，Bにおいて家庭用電力は各戸の燃料電池でおきかえ，そこへの分配は水素ガスのみとする。

モデルD：Cにおいて，各戸にMH貯蔵タンクを設置し，そこへの分配はMHトレーラーによるものとする。

(5) 輸送距離

輸送距離として次を考える。

モデルA：近距離，30km以内，県内に相当する。

モデルB：中距離，150km以内，隣県にわたる範囲に相当する。

モデルC：長距離，500km以内，地方内～全国の範囲に相当する。

(6) 需要変動時の処理

以上がシステム代替案の基本形であるが，需要変動時の処理は，上記のうち電力→水素への変換が行なわれるエネルギー基地，中間基地において調整し，分配センターではこれを行なわないものとした。すなわち，分配センターでは需要地近辺という性格からくる安全上，なるべく水素と電力とをシステムとして分離し，電力から水素への変換は行なわず，且つ水素から電力への変換は比較的安全と考えられる燃料電池によるものと考えたからである。

7－5－2 代替案構成上の不確定要素

手順としては種々の都市規模を想定した上で日本全体の都市分布を仮定し，以上の基本形にもとずきシステムを総合して行くことになる。これに必要な各基地および輸送の規模と分布は，技術上の実現可能性，経済性，環境保全などを考慮して決定されて行くことになるが，場合によっては非常に大きな超大型のエネルギー・基地を考慮することになる可能性もある。これらの構成を決定する場合，いくつかの前提条件が考えられるが，それらのうち特に不確定要素（決定しなければならないが，しかし不確定性をまぬがれない要素）と考えられるものの例を示す。

(1) 経済成長

(2) 産業構造の変化

(3) 原子力複合体の可能性

(4) 水資源，土地問題

(5) 環境問題からの抑制

(6) 人口ならびに生活形態の変化

7－5－3　水素の精製・貯蔵・輸送システムとしての具体的な代替案と個々の技術的検討項目

前項までに妥当と考えられるシステム代替案の基本形および代替案を構成する上で，決定しなければならないが，しかし，いずれも不確定性をまぬがれない要素について記載した。ここでは，それらの前提条件が決められたとして，水素のみに関するPSTシステムの具体的な代替案の一例を示し，同時に個々の部分における技術的検討項目を示す。

(1)　具体的代替案の一例

水素発生システムと利用システムとを結ぶPSTシステムの例を図7－7に示す。図には液体水素，水素ガス，MHそれぞれについてエネルギー基地中間基地又は2次中間基地，分配センター，最終利用における貯蔵，および輸送について示されている。更に水素3形態の相互変換のフローをも示してある。

最終利用については，それが利用システムの内訳とどのように関連しているかを民生用，輸送用，産業用について○印で示してみた。

(2)　個々の技術的検討項目

個々の部分に共通する環境安全性に関する検討項目としては，

1. 水素脆性
2. 破壊
3. リーク，爆発
4. 耐震性
5. 立地・環境・保安条件

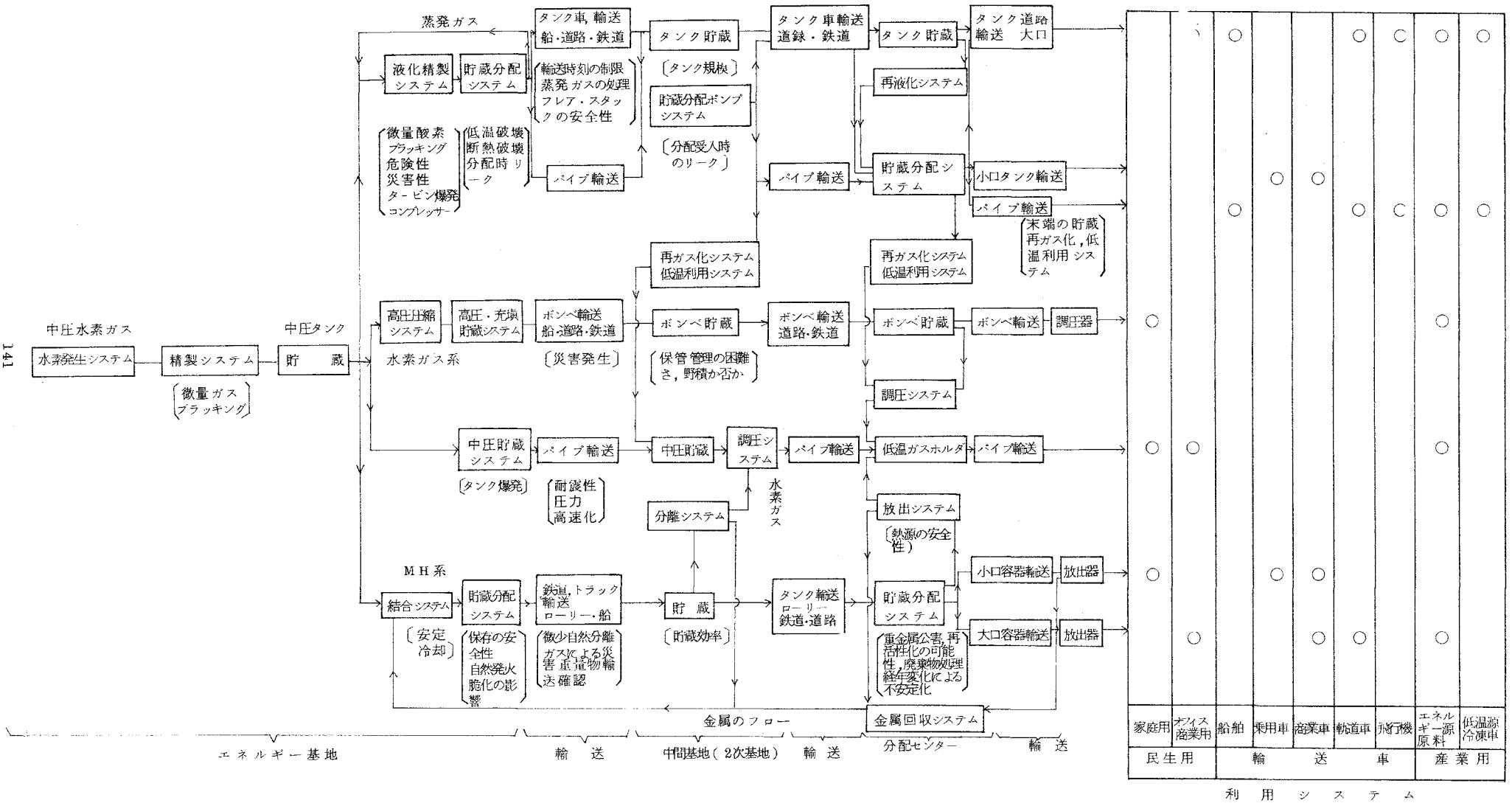
などがあり，一方，技術的実現可能性に関する共通検討項目としては，

1. 性能
2. 経済性
3. 利用率
4. 制御性
5. 対災害

などがある。

システム構成要素の個々の部分における技術的検討項目の主要なものを図7－7の各部分の下にカギカッコで示した。なお，記入のないところは他と同様であることを示している。

図 7 − 7　具体的な代替案と技術的検討項目



7－6　システム代替案の評価に関する検討

各種のシステム代替案のうち，どれを撰択すべきかを決定するためには，環境安全性および技術的実現可能性を定量的に評価しなければならない。ここでは，評価のためにはどのような事項が解明されなければならないか，その程度はどの位か，どのような方法で評価すればよいかなどについて述べることにする。

7－6－1　利用形態上での評価例

まず，評価がどのように行なわれるかの利用形態上の一例を，自動車用燃料としての水素について定性的に述べてみよう。これはPSTシステムにおける自動車用車上貯蔵に相当するものであるが，見方をかえれば，貯蔵－輸送－利用システムのミニアチャーに相当するものである。

(1)　各種燃料の比較

水素を自動車燃料として使用する場合，車上の貯蔵方式として，高圧圧縮ガス，MH，液体水素，水素から合成する燃料（methane, methnol, ammonia, hydragin etc.）などが考えられる。各方式の長所，短所を比較してみると表7－1のようになる。表7－1における◎は特に環境安全性に関する短所を示したものである。更に，自動車に積んだ場合の燃料と貯蔵容器の重量，体積を比較してみたのか図7－8である。

表7－1および図7－8で明らかなように，MH法と液体水素法が他よりも有利であり，この2つが競合するものと思われる。ただしMH法はまだ基礎研究が必要であるのに対し，液体水素法はすでにかなりの技術的経験があり，その点で一日の長があるが，一方液体水素によっては，その大量消費に見合う大規模基地が必要となる。

表７－１　水素を自動車用燃料として使用した時の比較表

	高圧ガス	金属水素化物	液体水素	水素から合成する燃料
長所	○現在技術で使用可能	○常温，常圧で水素を保持 ○高圧法によるボンベ重量より水素化物の重量は軽い ○複雑な容器を必要としない ○長時間の安定貯蔵が可能 ○使用規模の大小を問わない	○他の方法に比べ同一エネルギー当りの重量が軽い ○燃料供給系統が簡単 ○将来ガソリンと同じ程度のコストになりうる ○克服不可能な安全上の問題が少ない （低温工業の発展が期待できる）	○現在使用している炭化水素系燃料と性質が似ておりなじみが深い
短所	○必要量の水素を保持するためには１０００atm内外の高圧が必要 ○タンクの自重が重くなりすぎる ◎事故の際の爆発の危険が大きい	○燃料供給系統が複雑となる ○使用した後固形物が残る （回収する手段が必要） ○液化水素に比べて重くなる （水素含有重量比率が小さい） ○金属資源量の問題 （枯渇，高騰） ◎重金属公害の防止が必要	○自動車を運転しなくても燃料が消費される（ボイル・オフ） ○エネルギーに対する容積が大きい ◎低温液体としての安全上の問題 （特に注入時，衝突事故など）	○いずれも水素から製造するためコストが高くなる （メタン，メタノールについては炭素源が必要） ○ガソリンに比べ体積が大きくなる ◎現在直面している汚染問題がそのまま残される （CO，未燃ガス，窒素系については特にNOx問題）
問題点	○繊維入り複合材などによる軽量高強度タンクの開発が鍵 ○現状ではMHあるいは液体水素の補助的手段	○使用条件に合うような水素放出特性をもち，軽く，体積の小さい化合物を発見すること （用途別に2～3の代替金属が必要） ○液化水素法と競合すると思われる	○自動車に適合する液体水素タンクの開発 ○液体水素をトランスファーする器具の開発（誰でも安全に扱えること） ○液体水素の大量消費に見合う大規模基地が必要となる	○コストと汚染問題の点から合成燃料が将来自動車用として使われることはまずないと思われる

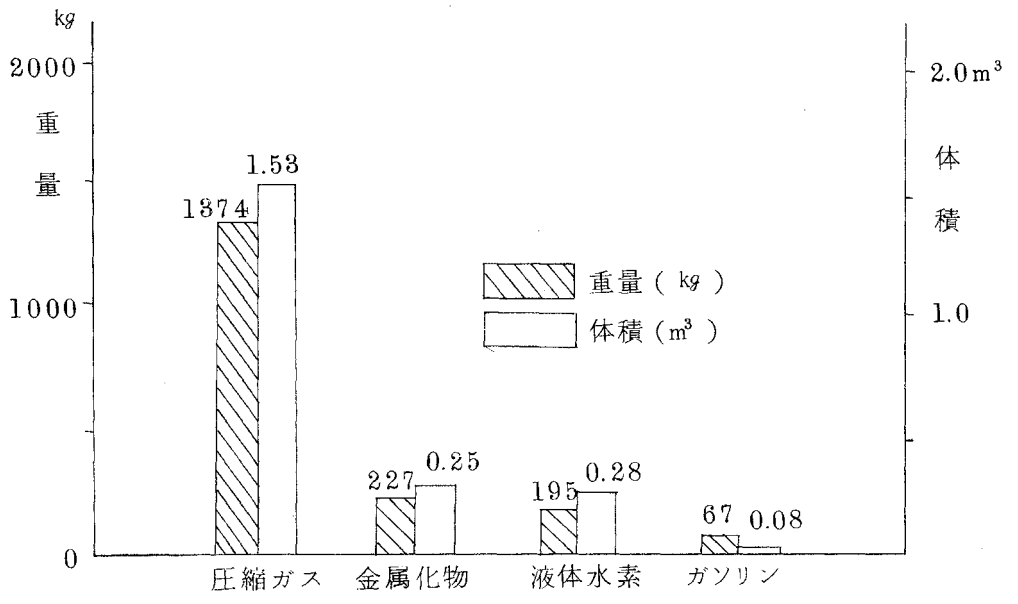


図７－８　各種水素燃料車上貯蔵方式による重量および体積の比較
（燃料＋貯蔵容器）
注：260miles(418km)走行自動車を仮定

なお，この両者を燃料供給構造上で比較した場合，ＭＨでは自動車用としての燃料供給系統が複雑となるが，液体水素ではその問題は少ないということが出来る。

(2)　液体水素の場合

液体水素を使用するにあたっては，液体水素の安全上の問題（７－６－５参照）を特に考えておかなければならない。液体水素を自動車燃料とする場合，その供給方法によって２つのシステムが考えられる。ひとつは，容器ごととりかえ，からの容器は中央のステーションに運んで一括充填する方法であり，他の１つは，現在のガソリンと同じように，容器は車体に固定して，液体水素そのものを車上容器に充填する方法で，車上容器に要求される特性項目はいずれの方法でも大差ない反面，地上基地の様相はどちらの方法をとるかで大きく変化する。（７－７－３参照）

液体水素用自動車では，機能上液体水素のガス化ボイル・オフ・ガスの処理の問題がある。ボイル・オフはわずかであるから，水素の拡散性を利用して大気放出しても大きな影響はないが，長期間運転しない場合の

車庫内のことを考慮すると，ボイル・オフ対策が必要となる。この場合は触媒燃焼させるか，燃焼電池との接続を考える必要があろう。
一方ガス化には，ボイル・オフの燃焼熱とエンジン排熱（冷却水と排ガス熱）を利用する系統を設置する必要がある。

更に安全対策として，タンクを2重構造としガソリン・タンクより破裂しにくくすること，事故時の被害を最小にする位置とすること，破裂したとき液体水素の飛散から乗員を守る方法などを考慮しつつ，タンクの適切な設計，注入部の安全設計，品質管理，定期的点検，供給完全自動化等を行なう。

タンクの材料としてはアルミ合金，銅，安定化オーステナイトステンレスなどが考えられる。

この他に作業員に対する取扱い上の安全教育を行なうための低温に関する一般教育，機器操作，作業チェック・リスト，定期検査法等および一般人に対する安全概念の浸透，安全法規，設備・機器・取扱いに関する規格の設定等を確立しておく必要がある。

(3) MHの場合

MHについては，まず軽量で水素含有量が大きく且つ作業温度が50～80°C，圧力1～20 atmの条件を満たすMHが必要である。次いでMHの生成，分解（結合，放出）時の熱移動を順調に行なわせるに必要な高性能熱交換方式を開発する必要がある。

上記の2点が解決されたとすると，MH用自動車の燃料供給系統は次のような構成になる。

○熱交換方式 ＜ 対流（直接熱交換）／伝導（間接熱交換）

○MHタンク ＜ 単一／複数 ｝いずれも構造上車上固定となろう。

○スタートアップの熱源 ＜ 低温MHの場合はそれ自身（要開発度大）／高温MH+LPG又は液体水素の燃焼（又は低温MHの利用）

○ＭＨ放出時の熱源 ― エンジン冷却水
― 排ガス熱
― 放出水素の燃焼

○ＭＨ結合時の冷却 ― 空冷
― 水冷
― 冷媒使用

その一例を間接熱交換法，直接熱交換法についてそれぞれ図７－９，図７－10に示した。

図７－９　ＭＨ用自動車の燃料供給系統（間接熱交換）

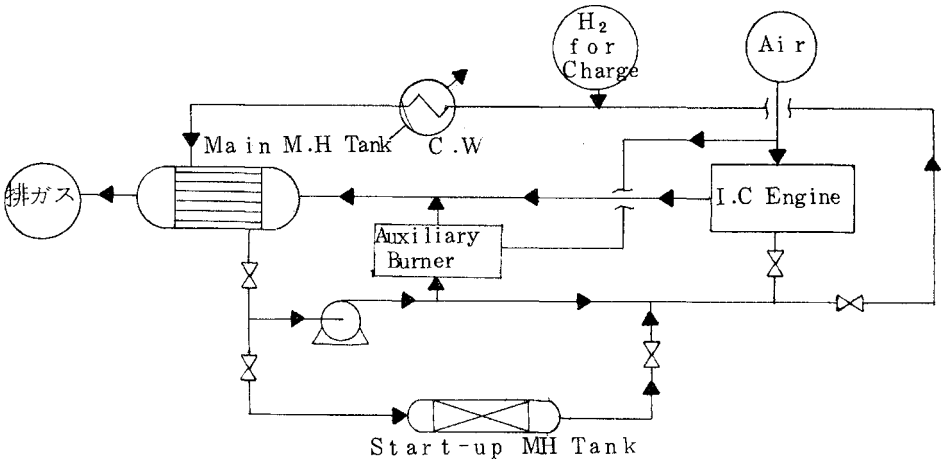
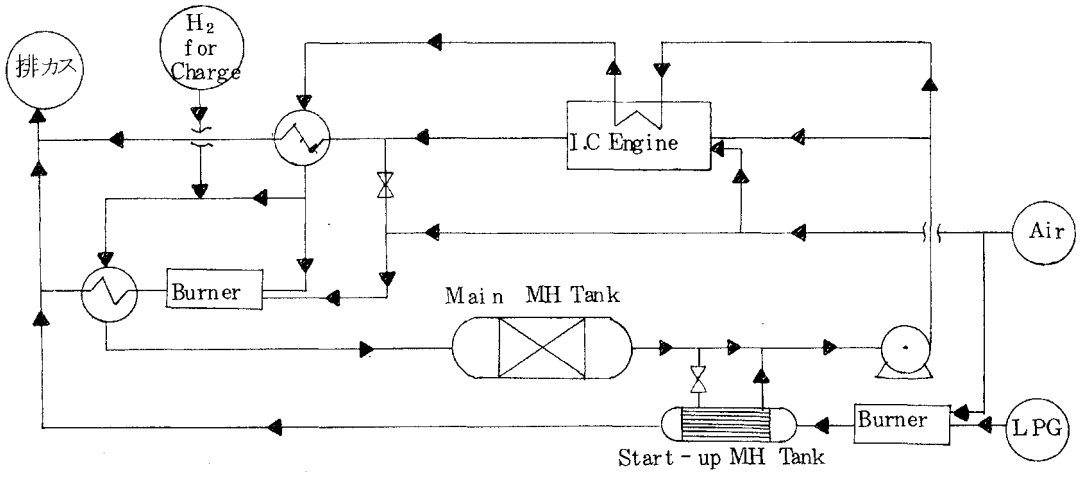


図７－10　ＭＨ用自動車の燃料供給系統（直接熱交換）



図示した如く，主ＭＨタンク，スタート・アップＭＨタンクおよびそれ

らをめぐる輸送パイプは，いずれの場合も相当複雑になる。その他にrefuelの時間が大きいこと，スタートアップ時に分解し終った金属も同時に加熱せざるを得ないこと（従って時間もかかること）などのこまかい問題が残る。

(4) 定性的評価にもとずく比較検討

以上2つの方式についてこれらを具体化する場合に必要な定性的評価を行なったが，いずれも基本的には自動車にかぎらず一般のPSTシステムの評価について言及されることである。

液体水素は技術的に相当すすんでおり，問題は供給の大規模化にあるに反し，MHはMHそのものの開発の成功に左右されることから，ここでは，競合する液体水素とMHのうち，将来の初期～長期に亘って液体水素用自動車が実用化されるが，画期的なMHが開発されれば中期～長期にわたって前者と競合的に共存するものと考える。

このように評価することにより，自動車用の液体水素，MHの供給システムが決定されることになる。表7－1の比較表は一見定性的ではあるが，実はこのような本質的な評価事項を含んでいるものなのである。

一方，図7－9，7－10は単なる自動車内の燃料供給系統とのみ考えるのではなく，MHに関するPRTシステムのミニアチャーとして考えることが出来るものでもある。

7－6－2 構成要素の規模と現状と将来

システム代替案を評価するためには，技術的実現可能性をあきらかにする必要がある。PSTシステムを構成する各要素の規模の技術的に可能な現状と，将来可能であろうと思われる又は可能としなければならぬと思われる規模を表7－2に示した。なお将来の各要素の規模は，水素の将来の需要を大胆に仮定した上で，国内および外国における現状を延長して推定したものであり，記載した推定値は百万人都市を対象として各要素を単独で使用したときに必要であると思われる容量である。

なお，たとえば輸送の場合に同一ルートで液体水素パイプライン，液体水素バルジ，水素ガスパイプライン等が併用される場合には，個々の方式

の容量はもちろんもっと小さくてよいことになる。またここではパイプラインの場合，ラインが1本ないし2本で必要量を送ることを考えているが，安全度の点で本数をもっと多くする必要があればそれぞれのパイプの1本の容量は，更に小さくてすむことになる。従って記載値は必要上限を示している。なお，表の脚注に注意のこと。

表7－2　構成要素の規模の現状と将来

項目		～1973年（現状）	1985年（短期）（ケース1）	2000年（中期）（ケース2）	2020年（長期）（ケース4）	備考
精製	○水素の精製*	○深冷分離法 20,000Nm³/hr (Linde, Air Products) ○石炭ガス化用化学精製法 340,000Nm³/hr (日本揮発油等) ○NH_3合成用原料 40,000Nm³/hr (推定) ○Pd拡散透過法 600~5,000Nm³/hr (Bishop, Engelhand, 日本純水素等)	○低純度精製 600,000Nm³/hr×1基 ○高純度精製 100,000Nm³/hr×2～6基	○低純度精製 1,000,000Nm³/hr×3基 ○高純度精製 500,000Nm³/hr×2～6基	○低純度精製 1,500,000Nm³/hr×4基 ○高純度精製 1,000,000Nm³/hr×2～6基	○高純度精製は液体水素，MHの必要量によって異る ○低純度精製は比較的可能性あり ○高純度精製はかなり困難
圧縮	○高圧水素用圧縮機*	○NH_3合成用H_2 50,000Nm³/hr (240kg/cm², 440kW) ○石油化学用H_2 143,000Nm³/hr (36kg/cm², 900kW) (以上は石川島播磨重工) ○その他 125,000Nm³/hr (300kg/cm²) (NH_3用推定) 400,000Nm³/hr (3,000kW) (推定)	○高圧用(300kg/cm²) 300,000Nm³/hr×2基 ○中圧用(20～70kg/cm²) 600,000Nm³/hr 1基	○高圧用 500,000Nm³/hr×5基 ○中圧用 1,000,000Nm³/hr×1～3基	○高圧用 700,000Nm³/hr×8基 ○中圧用 1300,000Nm³/hr×1～4基	○高圧用，中圧用の必要基数は水素の輸送形態によってきまる ○大型化はコストとの関係できめられるがかなり困難
液化	○低温精製および液化*	○30t/day (1.25t/hr, 17.6Nm³/hr, 14,000Nm³/hr) (Air, Products) ○60ton/day (Union Carbide Linde Div.)	○600t/day (25t/hr, 357m³/hr, 280,000Nm³/hr) ×2基 (全量液化の場合)	2,500t/day×3基 (全量液化の場合)	○5,000t/day×2～3基 (全量液化の場合)	○現状技術からのスケールアップはかなり努力が必要

項目		～1973年（現状）	1985年（短期）（ケース1）	2000年（中期）（ケース2）	2020年（長期）（ケース4）	備考
貯蔵	○水素ガスホルダー	○都市ガス用 18kg/cm², 3,000 m³ (54,000 Nm³)	○水素ガス用 20kg/cm², 3,000 m³ (60,000 Nm³)	○水素ガス用 20kg/cm², 10,000 m³	○水素ガス用 20kg/cm², 20,000 m³	○大型化はコストと他の方式との比較できめられる
	○液体水素貯蔵タンク*	○液体水素 85×10⁴ gal (3220 m³, 2500,000 Nm³) 2重殻, 7kg/cm² 内径18m 真空パーライト断熱 boil off 0.024%/day コスト $2/gal (Kennedy Space Center) ○LNG(2重殻型) 60,000 m³ 内径60m, 深さ23m (石川島播磨重工)	○20,000 m³タンク×1基(1日分備蓄) (15,680,000 Nm³) 2万m³容器は現在技術の延長で可能	○100,000 m³タンク×1基 (1日分備蓄) 無排気断熱型	○200,000 m³容器×1基 (1日分備蓄)	○H_2貯蔵には液化は最もふさわしいが大容量貯蔵は安全性ともからんで微妙 ○技術的には可能と思われる
	○MHタンク	○実績なし トレーラー用として10 m³を推定 (5,200 Nm³)	○50 m³ (26,000 Nm³)	○50 m³	○2,000 m³	○タンク自身は容易 ○熱交換器と金属そのものが問題
輸送	○長距離液体水素パイプライン**	○内径6 in(15cm) 1500ft(450m) (Kennedy Space Center) ○低圧用, 内径16in(40.6cm), 長さ150ft(45m) 2000psi(140atm)用, 内径10 in(25cm) 長さ75ft(22.5m) (Nuclear Rocket Development Station) ○600psi(42atm)用, 内径20in(51cm), 長さ500ft(150m) (Aerojet General Corp Liquid Roket Plant)	必要流量 ○168×10³ m³/day 内径25 in(63.5cm) 長さ300～500km	○797×10³ m³/day 内径50in(127cm) 長さ300～500km	○1655×10³ m³/day 内径50in×2本	○熱侵入を小さくして長距離に敷設するのはかなり困難

項目		～1973年（現状）	1985年（短期）（ケース1）	2000年（中期）（ケース2）	2020年（長期）（ケース4）	備考
輸送		○流量率は 10,000～60,000gal／min（13,630m³／hr）				
	○長距離液体水素バルジ（船）**	○24×10⁴gal(USA)（909m³） ○LNG用 1800×10⁴gal（6.8×10⁴m³）	○1×10⁴m³容量船×17回／day	○1×10⁵m³容量船×8回／day	○1×10⁵m³容量船×17回／day	○技術的には可能と思われる
	○長距離水素ガスパイプライン**	○天然ガス 内径600mmφ 平均60kg／cm² 流量2×10⁷Nm³／day（推定）	○13.2×10⁷Nm³／day 内径154cmφ 平均圧60kg／cm²	○62.9×10⁷Nm³／day 内径200cmφ 平均圧200kg／cm²	○130.1×10⁷Nm³／day 左記と同一のラインを2系統	○多数本に分ければ損失は増加するが技術的には楽
	○中距離液体水素パイプライン*	○長距離参照	○16.8×10³m³／day 内径8in（20.3cm） 長さ5～20km	○79.7×10³m³／day 内径16in（40.6cm） 長さ5～20km	○1655×10³m³／day 内径25in（63.5cm） 長さ5～20km	○技術的には可能と思われ
	○中距離水素ガスパイプライン*	○長距離参照	○13×10⁷Nm³／day 内径50mφ 平均圧60atm	○63×10⁷Nm³／day 内径65cmφ 平均圧200atm	○130×10⁷Nm³／day 内径90cmφ 平均圧200atm	○高圧による漏洩の問題以外は可能であろう
	○中距離液体水素鉄道タンカー	○2.8×10⁴gal（106m³） ○最大3.4×10⁴gal（129m³） （Lewis Res. Center）	同左	同左	同左	○補助手段
最終利用者用輸送・貯蔵	○液体水素トレーラー	○13×10⁴gal（49.2m³） boil off 0.25%／day ○最大2×10⁴gal（75.6m³） (Kennedy Center)	同左	同左	同左	○自動車の制限サイズに依存する
	○民生用液体水素容器	○25～1000ℓ LN_2シールド型 スーパーインシュレーション型	同左	同左	同左	○安全上の問題のほかは技術的な問題少なし

項目		～1973年（現状）	1985年（短期）（ケース1）	2000年（中期）（ケース2）	2020年（長期）（ケース4）	備考
最終利用者用輸送・貯蔵	○自動車用液体水素タンク	○実用例なし	○内容積 150～250ℓ (水素10～18kg) boil off 1～2%/day スーパーインシュレーションタイプ 現有技術による大量生産で$700～$1200	同左	同左	○自動車という重量，容量ともに制限されたところで所望する性能をみたすのはかなり努力が必要
	○水素ガスボンベ	○150～200kg/cm² 30～40ℓ (6～7m³)	同左	同左	同左	○材料の開発による
	○民生用MH容器	○実績なし	○内容積1～3m³ (3人家族で1ヶ月文) (500～1,500Nm³)			○金属の開発による
	○自動車用MHタンク	○実績なし	—	○内容積 200～300ℓ		○系統が複雑で開発にはかなり努力が必要

＊印は百万人都市1個を対象としている
＊＊印は百万人都市10個分をまとめて対象としている

7－6－3　定量的評価に必要な機器仕様を決定する手続き

水素の需要量にもとずきシステム構成要素の具体的な機器の仕様を決定し，その年間経費を算出して経済性という見地から代替案を定量的に評価する場合，どのような手続きを取る必要があるかを検討しておかねばならない。これは電算機用プログラムを作成する上でも必要である。以下に一般的な概略を例示するが，これらはいずれも水素に適するように作成されなければならない。

(1)　貯蔵－高圧水素ガス・タンク（球形）

(a)　$D = \left(\frac{6V}{\pi}\right)^{1/3}$

内容積（m^3）

内径（m）

(b)　$t = \frac{PD}{100f\eta} = C$

常用圧力（kg/cm^2G）

内径（mm）

くされ代（mm）

肉厚（mm）

接手効率

材料強度（kg/mm^2）（引張強さ）

(c)　$T = \pi D^2 \times t \times \rho \times 10^{-9}$

総重量（ton）　鉄比重 7.86（ton/m^3）

(d)　$C_{mat.} = T \times @C$

材料コスト（yen）　単価（yen／ton）

(e)　$C'_{total} = (2.26 \sim 2.59) \times C_{mat.}$

全建設費（yen）

(f)　一般附属品とは別に特に高圧水素についての保守，安全系統の必要性の検討

(g)　$C_{total} = C'_{total}$ ＋ 計装費

(h)　年間経費＝償却費＋保守費

(2)　貯蔵－液体水素タンク（球形，2重壁）

(a)　重量を同時に算出

(b)　断熱方式の検討 { 真空断熱 / パーライト断熱 } ＞ 断熱の程度～熱侵入（$Kcal/m^2 \cdot hr$）

cost算出

(c)　熱侵入から再液化能力の算出

(d)　再液化装置費と動力費の算出

(e) 保守・安全系統の検討と費用の算出

(f) Ctotal = (2.26～2.59)×(mat + 断熱費 + 再液化装置費 + 計装費)

(g) 年間経費 = 償却費 + 動力費 + 保守費

(3) 貯蔵－MHタンク

(a) 種類と選択(危険性，資源性，経済性等)

(b) 最高能力と反応(吸着)速度

(c) 反応熱(吸着熱)

(d) 水素化物の生成，水素の離脱方式の選択

(e) 必要容量，重量の算出

(f) 建設費の推定方法

(g) 用役費(ブロワ電力，加熱冷却費等)

(h) 年間経費 = 償却費 + 用役費 + 保守費

(4) 圧縮(高圧生成)

段数　　吐出圧(kg/cm²A)

(a) $$Ps = \frac{2.22}{\eta ad} \cdot \frac{ZK}{K-1} \cdot P_1 \cdot Q \left\{ \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{(K-1)/ZK} - 1 \right\}$$

軸馬力 (Ps)　断熱効率 (遠心55～75%)　比熱比 (1.4)　吸込圧 (kg/cm²A)　吐出風量 (吸込状態換算m³/min)

(b) 動力費 = 0.7355×Ps (kW)

(c) 圧縮機コスト = (物価指数／S.41年基準) × $2.153 \times 10^4 (kW)^{0.957}$

(d) 年間経費 = 償却費 + 動力費 + 保守費

(5) 液　化

(a) 所要冷凍トン

(b) 液化機規模∽建設費

(c) 動力費

(d) 年間経費 = 償却費 + 動力費 + 保守費

(6) 輸送－高圧水素ガス・パイプライン

(a) $$V = \frac{\pi}{4} \cdot D^2 \cdot U$$

流量 (m³/sec)　管内径 (m)　線速度 (m/sec)

(b) $t = \dfrac{P \times 50 \cdot D}{\sigma A \cdot \eta} + C$

肉厚 (cm)　内圧 (kg/cm²)　許容応力 (kg/cm²)　継手効率　くされしろ (m)

(c) $T = \dfrac{\pi}{4}\left\{\left(D + \dfrac{t}{50}\right)^2 - D^2\right\} \cdot \ell \cdot \rho$

管重量 (ton)　長さ (m)　鉄比重 (7.86 ton/m³)

(d) $C'mat. = T \times @C\ mat$

材料コスト (yen)　単位材料コスト (yen/ton)

(e) $C'valve = @C\ valve \times valve$

バルブコスト (yen)　バルブ単価 (yen/個)　ℓm当りバルブ個数

(f) $C'total = a \times C'mat. + b \times C'volv$

工事費比率… 工事費比率…… 地上，地中

(g) $C\ total = C'total +$ 計装費

(h) $Re = \dfrac{DU\rho}{v}$

レイノルズ数　ガス密度 (kg/m³)　粘度 (kg/m・sec)

(i) $1/\sqrt{f} = 3.2 \log(Re\sqrt{f}) + 1.2$

→ f の算出

(j) $\triangle P = \dfrac{4f \cdot \ell \cdot U^2 \cdot \rho}{2gC \cdot D}$

圧損 (kg/m²)　重力加速度 (m/sec²)

(k) 高圧生成 Ps 算出式中 $P_1 = P_2 - \triangle P$ として Ps 算出

(l) 動力費 = 0.7355・Ps

(kW)

(m) 年間経費の算出

(7) 輸送－液体水素パイプライン

(a) 重量を同時に算出

(b) 断熱方式の検討

(c) 建設費の推定（計装費共）

(d) 再液化必要量の算出

(e) 動力費の算出

(f) 年間経費の算出

(8) 精製

(a) 要求される純度の決定

(b) 精製方式の検討

(c) 精製規模の検討

(d) 用役費の推定

(e) 建設費の推定

(f) 年間経費の算出

(9) その他

以上のような計算は，それぞれ試行錯誤的に行なわれ，それぞれの項目の中で部分的な最適化が行なわれ，比較されることになるが，液体水素トレーラー，MHトレーラー，高圧水素タンクトレーラー，および各種の精製法についてもそれぞれ部分的な最適化が行なわれるべきである。

7－6－4 定量的評価に必要な機器の技術的検討項目

前項の手続きを実行する場合，7－6－2 構成要素の規模の現状と将来で示した各単基容量が制約条件となるがそれらはマクロな表現であって，実際の設計を行なう場合には，各機器の詳細なデータが必要である。ここでは，どのような技術的検討項目が必要かを，想定される対象別に示した。

(1) 遠隔基地からの輸送についての対象機器

エネルギー基地から中間基地への輸送につき，100万人都市×10都市分程度（水素 1.3×10^9 Nm^3／dayおよび電力 2.0×10^7 KW, 距離300～500 Km）の規模について次のような機器を対象に検討した。

I 低温送電

① 冷凍液化機（H_2，N_2，He）

② 低温ポンプ

③ 長尺クライオスタット

④ 断熱材

⑤ 断熱支持材

⑥ ケーブル

⑦ ジョイント（電気・真空・ターミナル）

⑧ バルブ

⑨ 周辺機器

⑩ 真空ポンプ

Ⅱ 超電導送電

Ⅲ 超高圧送電

Ⅳ 水素ガス輸送

① コンプレッサー（精製機器）

② ガス分析器

③ パイプ＆パイプ材料

④ バルブ，ジョイント（expansion）

⑤ 耐震，耐蝕

⑥ 輸送（地中，地上，高架に必要な機器）

⑦ ブースター

⑧ 断熱

〔設置場所と環境〕

⑨ バッファータンク

⑩ 周辺機器

Ⅴ 液体水素輸送

(a) パイプライン輸送

①～⑩低温送電参照

(b) バルジ

① バルジ（再液化機を含む）

② 水素ディーゼルエンジン

③ 低温分配機器

(c) 液体水素貯蔵タンク

(2) 基地内での輸送・貯蔵・変換についての対象機器

中間基地，２次中間基地内および基地間での輸送，貯蔵，変換につき１００万人都市１個分程度（水素 1.3×10^{8} Nm^3／dayおよび電力 2.0×10^{6} KW，基地内距離１Km以下 基地 間２０～１００Km）の規模について次のような機器を対象に検討する。

Ⅰ　液体水素

①液体水素貯蔵容器

②液体水素トレーラー

③低温ポンプ

④液化機

⑤再液化機

⑥低温エンジン

⑦発電機（低温利用）

⑧蒸発機

⑨低温精製機

⑩液体水素パイプライン

Ⅱ　水素ガス

①圧縮機

②中圧ガスホルダー

③ガバナー

④中圧ガスパイプライン

Ⅲ　ＭＨ

①ＭＨ製造装置

②加熱冷却源

③ＭＨトレーラー

Ⅳ　共　通

①分配配管系統

②変電設備

Ⅴ　燃料電池

Ⅵ　水素火力発電

Ⅶ　石炭→ガス

①石炭貯蔵庫

②輸送車（石炭）

③ガス化プラント（水素ガス製造）

④同上精製装置

Ⅷ　電気 $\xrightarrow{H_2O}$ 水素

①水ポンプ

②電解装置

③附帯槽類

④海水淡水化装置

⑤ by-product 処理装置

Ⅸ　相互変換用周辺機器

(3)　中間基地から分配センターまでの輸送，貯蔵，変換についての対象機器

中間基地から分配センターまで（分配センター内を含む）につき，100万人都市１個分程度（分配センター数は１０ケ程度，距離は５～20㎞）の規模につい

て次のような機器を対象に検討する。

Ⅰ　電　力

①超電導送電

②低温送電（前項参照）

③変電設備

Ⅱ　水素ガス

①パイプライン

②ガスホルダー

③着臭・着色装置

④ガバナー

⑤周辺機器

Ⅲ　液体水素

①パイプライン

②タンクローリー（大口，小口）

③都市間中距離輸送車輌

④再液化装置

⑤ガス回収装置（MH）

⑥ガス燃焼処理装置（フレア・スタック）

⑦貯蔵タンク

⑧分配系機器

Ⅳ　MH

①MHスタンド

②MHタンクローリーセンター

Ⅴ　相互変換用周辺機器

(4)　分配センターから末端利用までの輸送・貯蔵についての対象機器

分配センターから末端利用までの輸送（1～5㎞），貯蔵について次のような機器を対象に検討する。

Ⅰ　電　力

①産業用ケーブル

②電動車用充電装置，ケーブル

③民生用ケーブル

Ⅱ　水素ガス

①産業用，民生用パイプライン

②需要者用安全バルブ・ジョイントなど

Ⅲ　液体水素

①産業用トレーラー

②内外燃機関

③車上容器（液体水素自動車）

④民生用容器

Ⅳ　MH

①産業用トレーラー，タンクローリー

②民生用容器

③MH自動車

Ⅴ　安全装置関連機器

(5) 対象機器に対する技術的検討項目

上記した対象機器の個々について，それぞれ次のような項目を国内のみならず世界的レベルで技術的に検討し，マトリックスとして完成させなければならない。

種類（原理）	形式（条件）	材質	メーカー	目標値 向上ステップ 適正限界—現状技術の上限 性能	容量スケールアップ	製造加工技術（現状と問題点）	設計式基準値

信頼性 耐久性（目標値と実現可能性）	安全性（問題と対策）	新たに必要とするR＆D（特に基礎的工学,技術,材料）	コスト推定（R＆D,設備投資,運転費）	システム技術（現状と問題点）	国産技術の目標と見通し

なお，PSTシステム用機器を製作する場合，それらの製作し，定常的に市場に供給するために必要なバック・グランド・システムを常に念頭において検討する必要がある。

7－6－5 現在のエネルギーにおける環境安全性

現在用いられているエネルギーに関する環境安全性につき，災害の形態という形で項目の洗い出しを行なうと図7－11となる。

7－6－6 水素精製，貯蔵，輸送システムにおける環境安全性

(1) 安全上の物性の比較

表7－3に水素，メタン，ガソリンの安全性の物性の比較を簡単に示す。

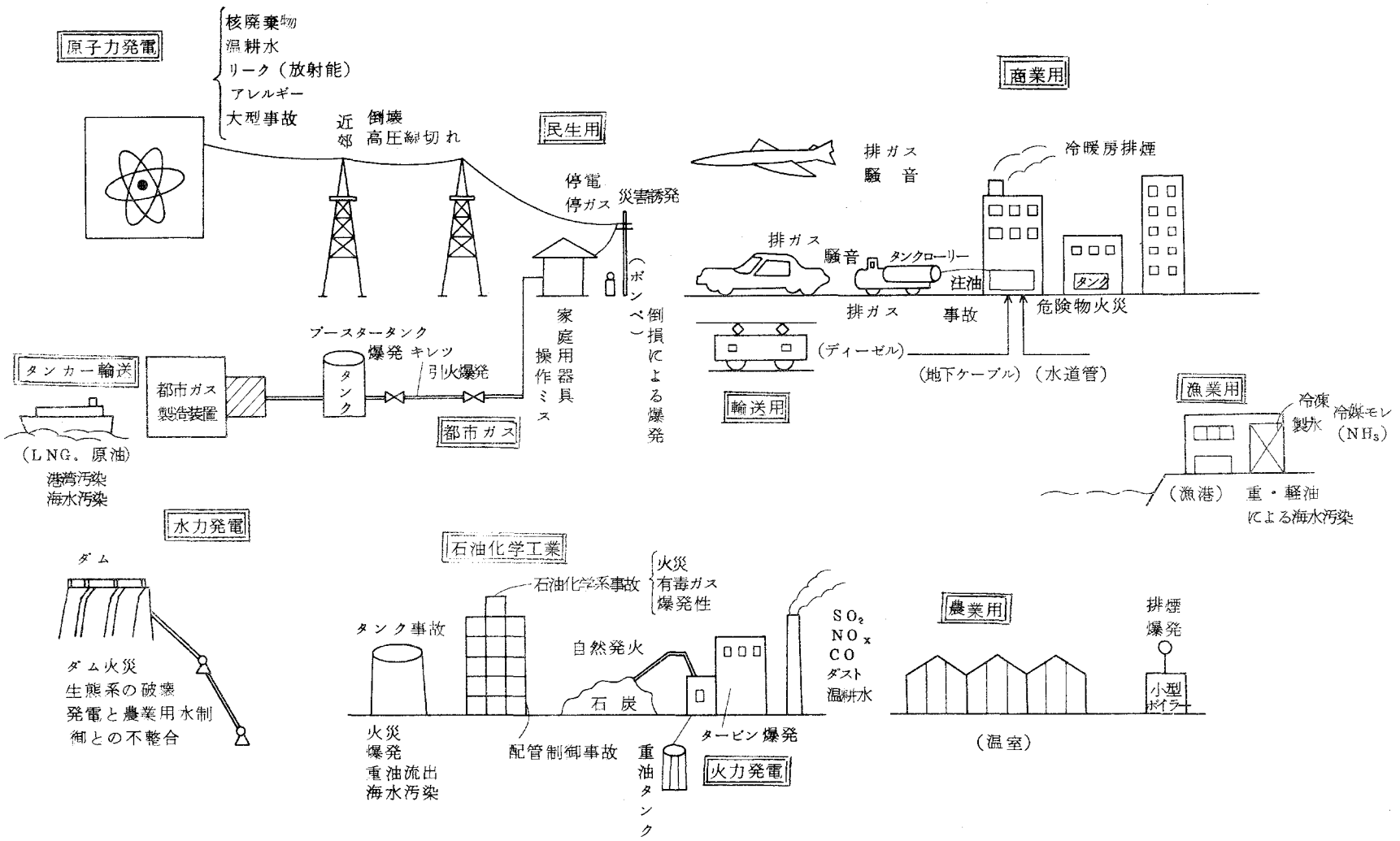
表7－3 安全性の物性の比較

Property		H_2	Gasoline	CH_4
Combustion range in air (volum)	(%)	4－75	1.5－76	5－15
Ignition temperature in air	(K)	858	530	810
Minimum ignition energy	(mJ)	0.02	(0.25)*	0.30
Flame temperature	(K)	2323		2153
Flame velocity	(cm/sec)	270	(<30)	38
Flame emissivity		0.10	(>0.1)	—
Quenching distance at 1 atm	(cm)	0.06	(>0.25)	0.25
Diffusivity	(cm^2/sec)	0.634	(0.08)	0.20

＊括弧内の数値は推定値

主としてG.G.Haselden ed "Cryogenic Fundamentals"(Academic Press 1971) Chap 11による。

図 7 － 11　現在のエネルギーにおける環境安全性



(2) 水素自体に関する安全性

水素自体の安全性の長所，短所を列挙すると次のようになる。

(a) 長　所

○人体への毒性がない

○拡散率が高く，すぐ燃焼組成以下になる（0.634cm^2/sec）

○着火温度が高い（858K）

○COのような毒性の燃焼物をつくらない。

○炎の輻射率が小さい。従って熱輻射による延焼は少ない。

(b) 短　所

○燃焼範囲が広い（4－75％），特に下限が問題でメタンと同程度である。

○着火エネルギーが小さい（0.02mJ）ので着火しやすい。

○燃え広がる速度が速い（270cm/sec）

○消火距離が小さい（0.06cm）

○炎の輻射率が小さい，従って炎を発見しにくい。

水素による事故は，水素の存在，および着火源の存在にあるから，当然ながら安全の基本は漏洩防止，適切換気，着火源の除去にある。

(3) 低温体水としての安全性

水素ガス，液体水素，MHのうち液体水素は，他の低温液体と同様の安全性の問題がある。すなわち，

○沸点が低い（20.4K）ので人体の凍傷につながる。

○空気中の酸素の濃縮のため爆発の危険がある。

○液をとじこめた時の圧力上昇（リリーフバルブ，放出された水素の処理，フレアスタックなどの対策を要する。）

○出口のない部屋の内部で蒸発したときの窒息の危険性。

○貯蔵容器内への不純物の蓄積（定期的ウォームアップ，および不純物の危険をとりのぞくための等別な成分分析技術が必要）。

○容器材料の性質変化（低温脆性，熱収縮，Cooldown時の歪など）。

(4) 現在のエネルギーとの環境安全性上の対比

図7－11の現在のエネルギーとの対比をしながら，水素エネルギーの環境

安全性に関する項目を洗い出すと図7－12となる。ここでは水素の製造については未知の分野が多すぎるので記載していない。図7－12の実線で囲んだ部分は，現在のエネルギーにくらべて有利となる項目を示しており，点線で囲んだ部分は，現在と同じく問題となる項目，新たに問題となる項目，不明の項目，又は要開発の項目を思いつくままに記入したものである。

全体からみて，クリーン・エネルギーであることが共通であるが，意外に利点が多く，不利な部分も技術的な未開発項目に関する事項が多く，本質的な欠点は対熱量容量比が大など（この欠点も対熱量重量比は小で相殺可能な場合もある。）非常にわずかであることが明らかとなる。

7－6－7　環境安全性の評価手法の考え方

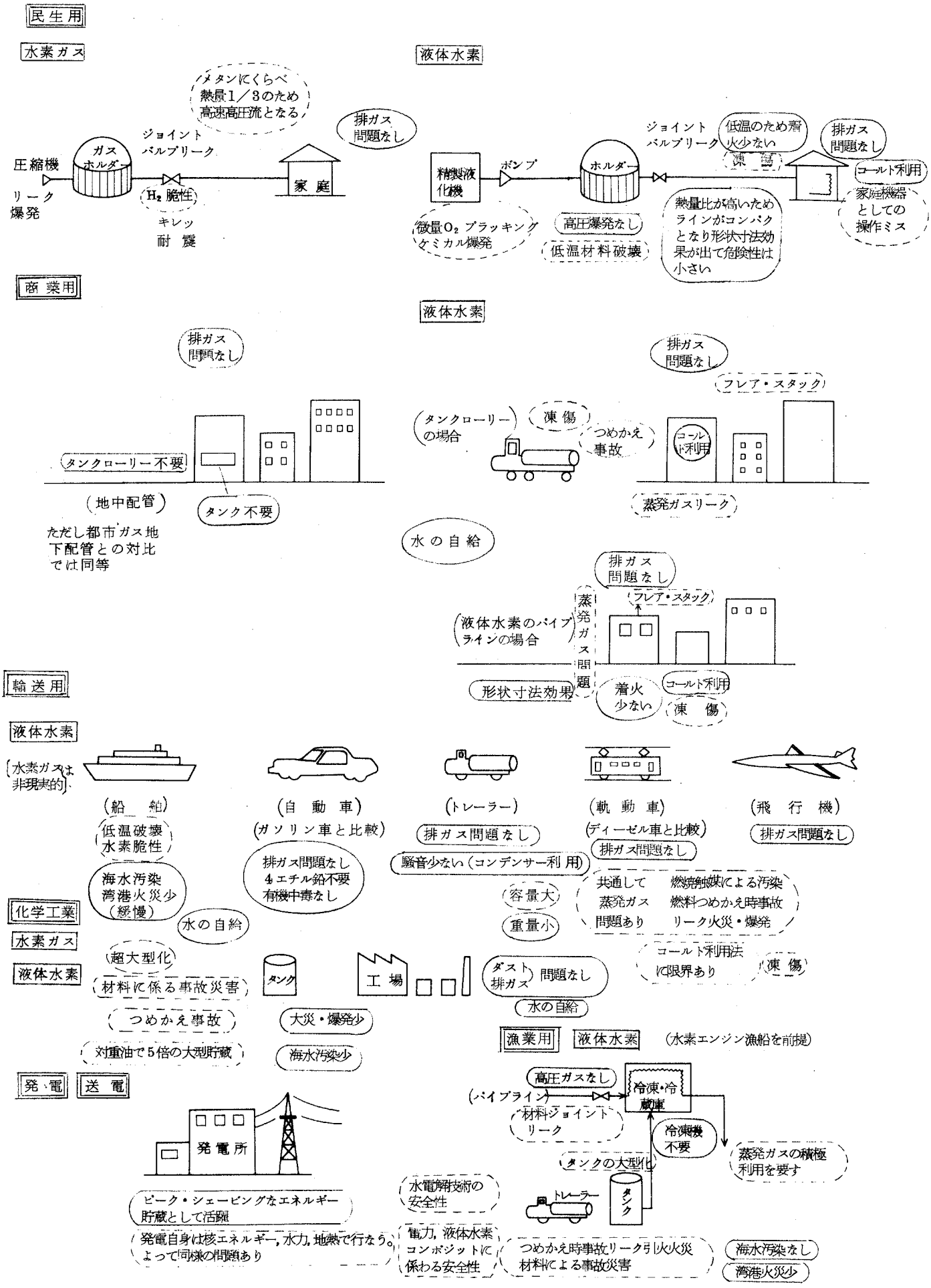
(1)　環境安全性の評価について

環境安全性を定量的に評価することは相当困難である。特に環境に居住する住民の不安意識，事故による環境の汚染の定量的表示は難かしい。しかもこれらを科学的根拠にもとずいて表示する必要があるのだからなおさらである。ただ，たとえば軽水炉の安全性が相当数報文で発表されているにもかかわらず，これに対する一部の住民不安がいまだに解消されていないのは，実際に緊急冷却用パイプのき裂などが発見され炉停止による点検が行なわれているなどの事実に対する住民の不信感と，これが問題ない程の小さい出来ごとであるというより科学的なPRの不足による住民の不安感と，更に原子力発電による住民のうける恩恵を自己評価せずにいたずらに不安意識のみをふりかさず住民のエゴによるもの，およびこれらを意識的に助長しようとする組織の存在によるものである。

新しい水素エネルギーについては，このような事態をまねくことのないよう，実用化以前に十分長期間にわたりモデルプラントを運転して環境安全性を実証しておくことが唯一の手段であることはいうまでもないが，これと並行して又は次善の策として他の燃料との環境安全性の比較を，物性を中心として表示することが1つの可能な手段であると考えられる。

このことは，製造と利用を連結し，環境と最も多く接触する可能性のあるPSTシステムにとって特に重要である。

図7－12　水素エネルギーにおける環境安全性



なお，水素エネルギー・システムの将来の実現可能性について消極的な意見も多少うかがわれるが，前項以前に示したように水素のクリーン・エネルギー性その他の長所を否定する程の本質的な欠点が見当らない以上，たとえその実現時期が遠い将来であろうとも，日本民族の末裔の発展のために，我我には積極的にこの開発を現時点から推進する義務があるものと信ずるものである。

(2) 評価手法の一例

環境安全性の評価手法の一例として環境安全評価指数を考えこれを次のように定義する。

環境安全評価指数（ESC）$=A(\text{因子}-1)^{a}\cdot B(\text{因子}-2)^{b}\cdot C(\text{因子}-3)^{c}\cdots$

A，B，C，……，a，b，c，……はそれぞれの因子間の重みずけとして何らかの手段で決定するものとし，因子－1，因子－2，因子－3，…に主として物性を表示する数値を割り当てる。ESCは燃料の相違によって判断され，又同じ水素であっても水素ガス，液体水素，MH間の相違によって環境安全性が判断される。

これらの因子として次の物性等が考えられる。すなわち，

(a) 燃料関係因子

- ○最低点火エネルギー
- ○着火点
- ○反応熱（爆発熱）
- ○火焔温度
- ○火焔輝度（火焔輻射度）
- ○火焔逸送限界（消火距離）
- ○燃焼範囲
- ○燃焼速度（爆発速度）
- ○燃焼による体積膨脹比
- ○燃焼による最高到達時間
- ○燃焼による圧力上昇速度
- ○単位熱量当りの燃焼排ガス中の環境汚染物量

(b) 拡散関係因子

- ○単位容量当りのポテンシャル・エネルギー（漏洩噴出速度）
- ○比重（対空気又は対水）
- ○粘度
- ○拡散係数（対空気又は対水）又はシュミット数（$\mu/\rho\cdot D$）
- ○表面張力

(c) 潜在的状態量関係因子

○温度（そこに存在している状態下での）

○蒸気圧（　　〃　　）

○熱容量

○熱伝導度又はプラントル数（$Cp\mu/\lambda$）

○単位体積当り（又は／および単位時間当り）熱量

○蒸発潜熱

○体膨脹係数

○自由エネルギー（又はエントロピータムT・S）

○熱伝達係数（そこに存在している状態下での境膜）

○その他の流動・伝熱特性を示す定数

(d) その他の因子

○材料腐蝕性

○猛度（＝密度×爆ごう速度×爆ごう波背面のガス流速）

○爆風衝撃量（＝f（波頭余圧，正圧力継続時間，余圧の時間退衰パラメータ））

○安全距離（＝係数×（量）$^{1/2}$）

○騒音，振動に関する定数

○その他

なお，以上の因子には機器，材質そのものの技術的因子は入っていない。このように考えればほぼ純粋に燃料自体を指数によって比較評価することが出来る。これらの具体的作業，因子の重みづけなどは今後の課題である。

これらの環境安全評価指数は，水素エネルギーによって与えられる恩恵と対比され，一方その安全性を実現する為に必要な経済性と対比される。

一般的にいえば，この安全性と経済性とは技術的な実現可能性の範囲内でトレード・オフの関係があるので，大半の国民的合意の上で，明確なある協調点を見出し実行に移されることになろう。

7－7　参考モデル例

7－7－1　実験的な水素精製・貯蔵・輸送

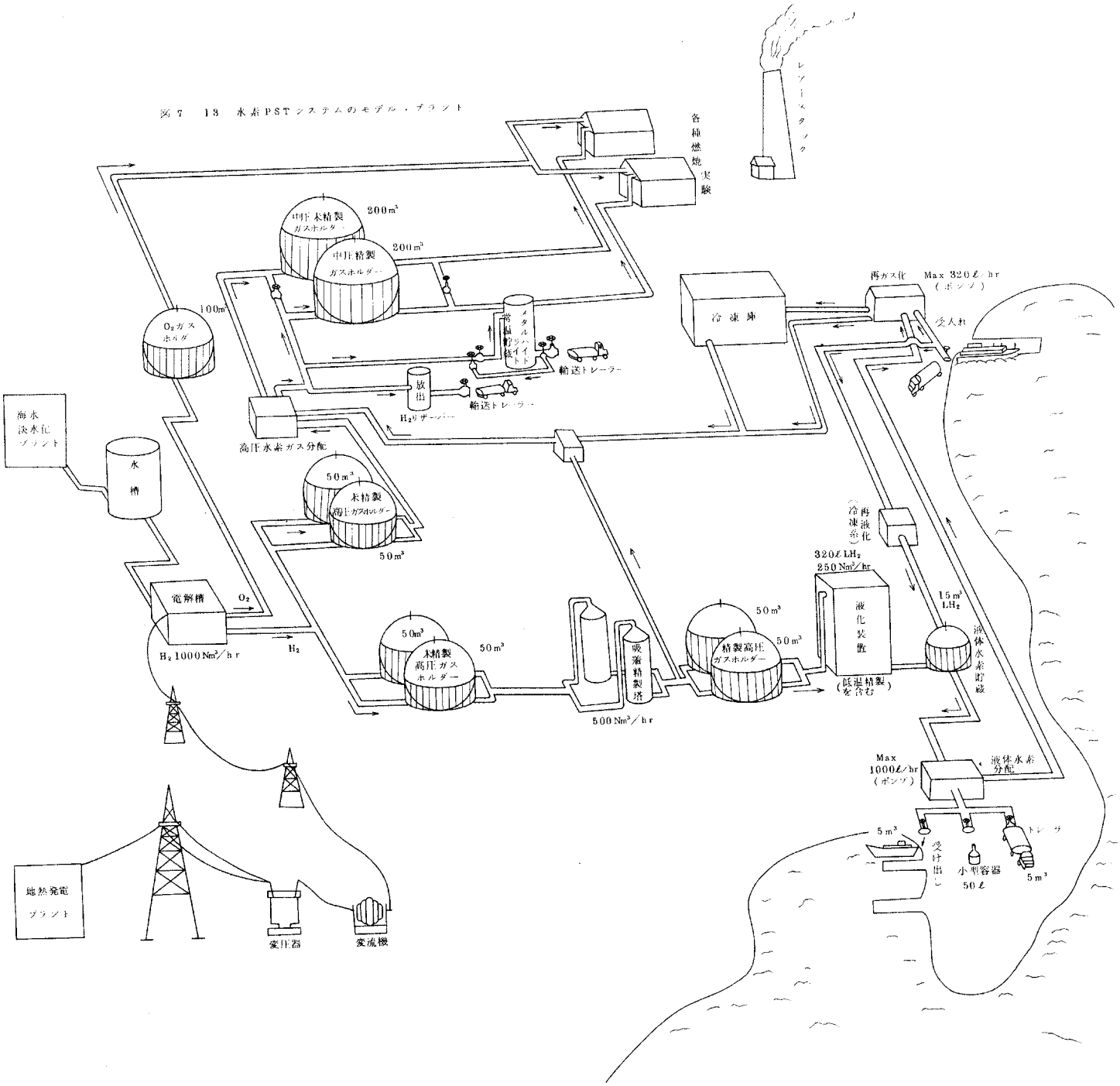
前節で示したように，長期間にわたるモデル・プラントの運転が必要である

と思われるので，PSTシステムの実験的なモデルの一例の概念図を図7－13に示した。これはモデル基地としての例であり，§7－2水素PSTシステムの基本としてかかげた3つの水素の形態の系統を有機的に結合したものであり，規模は水素1,000Nm³／hr，精製500Nm³／hr，320ℓ／hr，液体水素，高圧ガスホルダー50m³などであり，構成要素の主な規模をまとめて表7－4に示した（資料はIRI）。

表7－4　水素PSTシステム・モデル・プラントの構成要素

構成要素	規模	数量	備考
高圧水素ガスホルダー	30kg／cm²，内容積50m³	6基	基礎工事共
中圧水素ガスホルダー	20kg／cm²，内容積200m³	2基	約10時間分の貯蔵，基礎工事共
高圧水素ガス分配用配管	5インチ　30kg／cm²	100m	フランジ接続，エルボ，チーズ，バルブ，架台，施工共
精製装置	500Nm³／hr	2基	吸着方式，透過膜方式各1基
水素化物常温貯蔵装置	バッチ式，担持，H_2量100～200m³，内容積100ℓ	2基	金属水素化合物，チタン又はマグネシウムを想定タンク，バルブ，熱交換器，計装共
トラック	金属水素化合物輸送用	1台	防災設備共（特注）
液化装置	320ℓLH_2／hr	1式	低温精製250Nm³／hr，液化機320ℓLH_2／hr コンプレッサー，パラへ変換，簡易建家共
液体水素貯蔵タンク	15m³ LH_2	1基	約2日分の貯蔵 真空パーライト断熱方式
液体水素分配用ポンプ	Max 1000ℓ／hr	1基	分配，循環用
液体水素分配用配管	1インチ配管	100m	0.2m／sec，フランジ接続，エルボ，チーズ共 真空パーライト断熱方式，施工共
液体水素受入・受出設備	受入1基，受出1基	2基	1インチバルブ，フレキシブル形式，附帯工事共
再ガス化装置	Max 320ℓLH_2／hr	1式	冷凍，冷蔵，淡水化用　熱交換器 加熱装置，計装，簡易建家共
再液化装置	60Nm³／hr	2基	冷凍系，計装共，予冷系統
液体水素用タンカー	タンク積載方式 内容積5m³LH_2	1隻	海上輸送実験用
液体水素用トレーラー	タンク積載方式 内容積5m³ LH_2	2台	陸上輸送実験用
液体水素用小型容器	200ℓ用	5個	液分配試験用（特注）
液体窒素製造装置，貯蔵装置	100ℓLH_2／hr	1基	基礎，配管，計装共
液体水素用調節弁，高圧水素ガス用調節弁，緊急遮断弁，安全弁，その他制御用弁		1式	安全制御実験用共
制御系漏洩検出器 計測管理機器等		1式	水素精製，輸送，貯蔵，システム用のみ 配線，配管，計測パネル，簡易制御 建家工事共
架台，工事，アセンブリー等		1式	以上に特記したものを除く

図7　13　水素PSTシステムのモデル・プラント



7－7－2　空港モデルの一例

液体水素を航空機燃料とした場合の空港における水素PSTシステムの一例を示した。（資料はIHI）

(1)　前提条件

新東京国際空港公団業務解説，Products for Liq. H_2 Fueled Commercial Aircraft(1973) 等を参照しつつ次のような前提条件をおいた。

(a)　基本前提

○成田空港と同規模の空港を想定する。

○昭和61年度の推定航空燃料給油量を基にする。

○モデル空港を使用する全ての航空機が液体水素を燃料とする場合を仮定する。

○水素ガスは製造基地から，ガス・パイプラインで送られると仮定する。

(b)　成田空港給油量

成田空港における航空燃料（JETA－1, JETB）の給油量を表7－5と推定した。

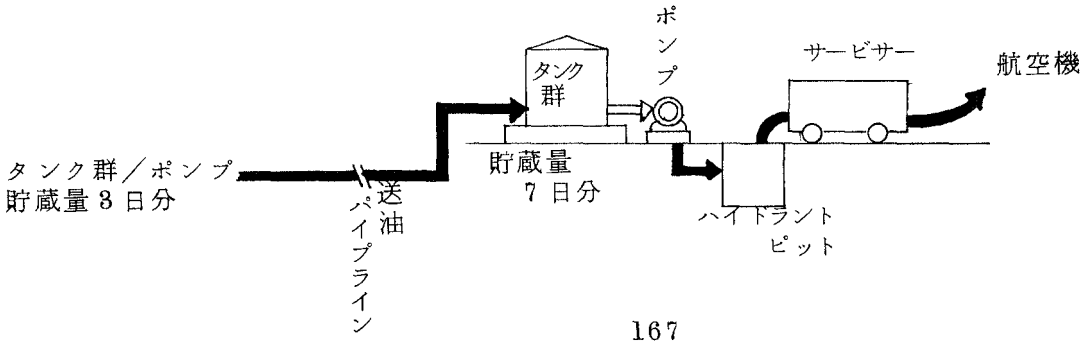
表7－5　航空機燃料給油量の推定

	年間給油量	一日平均給油量
昭和51年度	2,000 10^3 Kℓ	5,500Kℓ
57年度	3,700	10,000
61年度	5,500	15,000

(c)　成田空港給油方式

千葉港頭に油送船で運ばれてきた燃料を，図7－14の如くパイプラインで空港まで送油し，そこからハイドラント給油方式により，航空機に給油するシステムを採っているので，この方式を採用する。

図7－14　千葉港頭基地図



(2) 液体水素燃料としての検討

成田空港における昭和61年度の航空燃料給油量は1日15,000Kℓと推定されているので，モデル空港での液体水素供給量も，同じ熱量とした。ジェット燃料15,000Kℓは，熱量換算で水素にすると約4,630ton となり，水素製造基地で石炭から製造された水素ガスは，パイプラインで1日約5,000ton 空港まで送られるものとする。水素ガスは，空港内に設けられた液化機で液化され，液体水素貯蔵タンクに一時貯えられる。水素液化機は，1,500ton/day 製造能力の施設を5基設置し，その内3～4基を常時運転して，定期整備や故障に備える。又，貯蔵施設は，水素製造基地やパイプラインの故障による水素ガス輸送停止等を考慮して，空港1日平均給油量の10日分を貯蔵できるタンク群を建設する。タンク群は，航空機の離着陸の妨げとならないように地下タンクとする。航空機への液体水素供給は，貯蔵タンクから，ポンプで地下の液体水素ラインを通り，給油スタンドで，液体水素を供給する方式と成田空港のように，エプロンの各所にハイドラントピットを設け，多数の航空機に同時に給油する方式の二通りが考えられる。給油スタンド方式は，配管距離を短くでき，接続部も少ないので，液体水素の供給には都合が良いが多数の航空機に同時に給油することができないので，空港の運航面からは，ハイドラント方式の方が秀れている。しかし，いずれの方式でも，エプロンのスポットに駐機中の航空機のタンクが蒸発した水素ガスの回収ラインは必要となる。モデル空港案では，ハイドラント方式を採用したが，数kmに及ぶ液体水素地下配管や，サービサーのチューブ等の困難な問題がある。

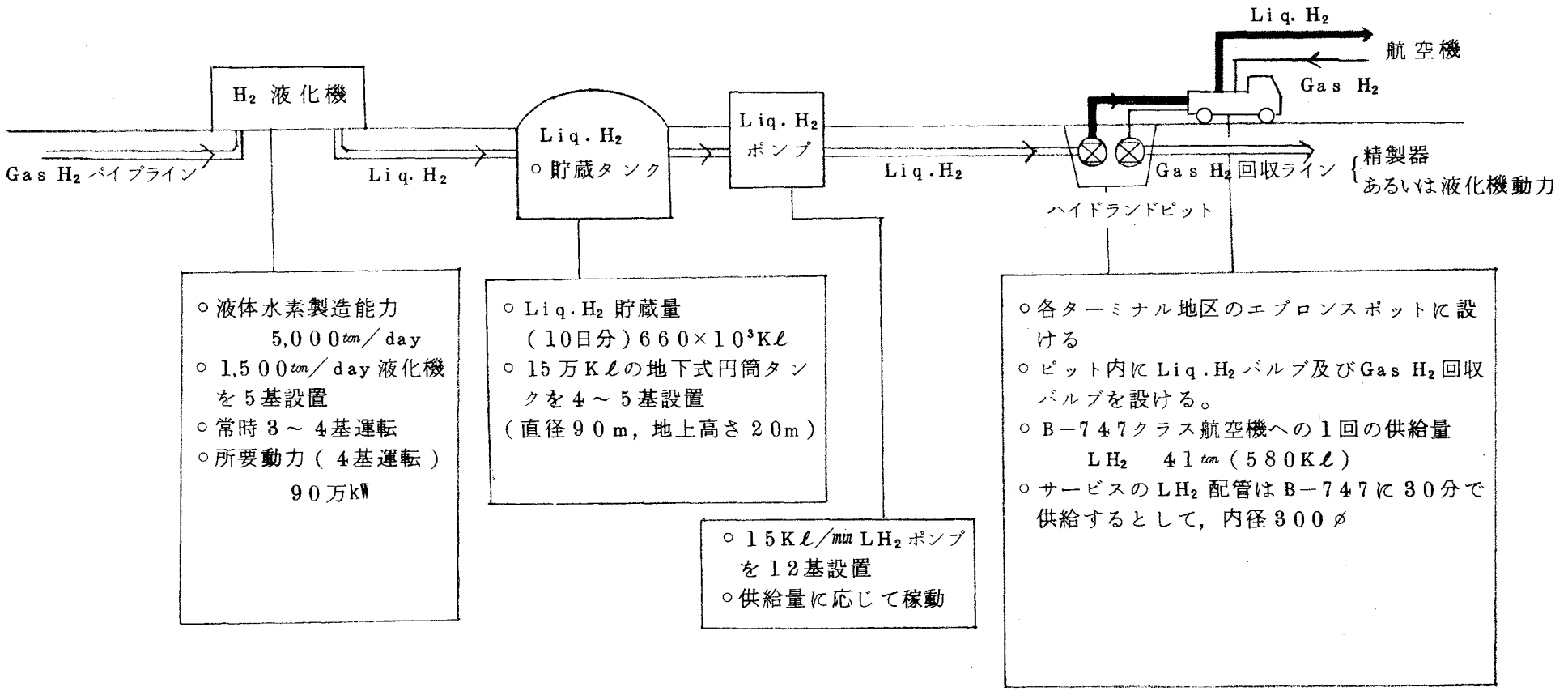
(3) 空港モデルの精製・貯蔵・輸送

以上のような前提で，空港における水素のPSTシステム・モデルのフロー図および構成要素の概略値を示すと図7－15となる。なお，回収水素ガスラインは精製機を通って再液化することも考えられるが，むしろ液化機の動力源として使用した方が良いと考えられる。

7－7－3 自動車用スタンド・モデルの一例

液体水素を自動車用燃料とした場合のスタンドにおける水素PSTシステムの一例を示した（資料はアイシン精機）。

図７－１５　空港モデルのフロー図および構成要素の概略値



備　考：

○現在世界最大液化機は
６０ton／day

○世界最大 LH_2 貯蔵タンクは，
3,400Kℓ

○ LNG 貯蔵タンクで１５万Kℓ
地上タンクを建設中

○成田空港のハイドラントピットは
２５２コ

○ B－７４７の１回給油量は
34,000～35,000Gal
給油時間１５～３０分

(1) 自動車への種々の水素供給法

7－6－1で自動車燃料としての可能性について比較検討し，システム代替案の評価例として述べたが，ここではどのような供給法をとるべきかについて検討した結果を表7－6に液体水素，MH，ハイブリット方式，その他について示す。

(2) 自動車用液体水素スタンド・モデルのPSTシステム

液体水素を自動車用燃料とし，現在のガソリン・スタンドのような自動車用液体水素スタンドを想定した場合の水素PSTシステムの一例を図7－16に示した。これはW.F. Stewart and F.J.Edeskuty, ASME, 73-ICT-78(1973)を参考としたものである。

自動車用容器は190ℓ(418km走行用)とし，その供給時間は1回3分とした。

このスタンドでは，49,000ℓトレーラーにより年72回の供給を主体とし，その時ボイル・オフ水素ガスのみを再液化する液化機を設置した場合と，水素ガス・パイプ・ラインで320Nm^3/hr供給しこれを液化する液化機を設置した場合を示してある。

このスタンドの年間取扱量は49,000ℓ×72回＝3,528m^3（約250T／年）となる。

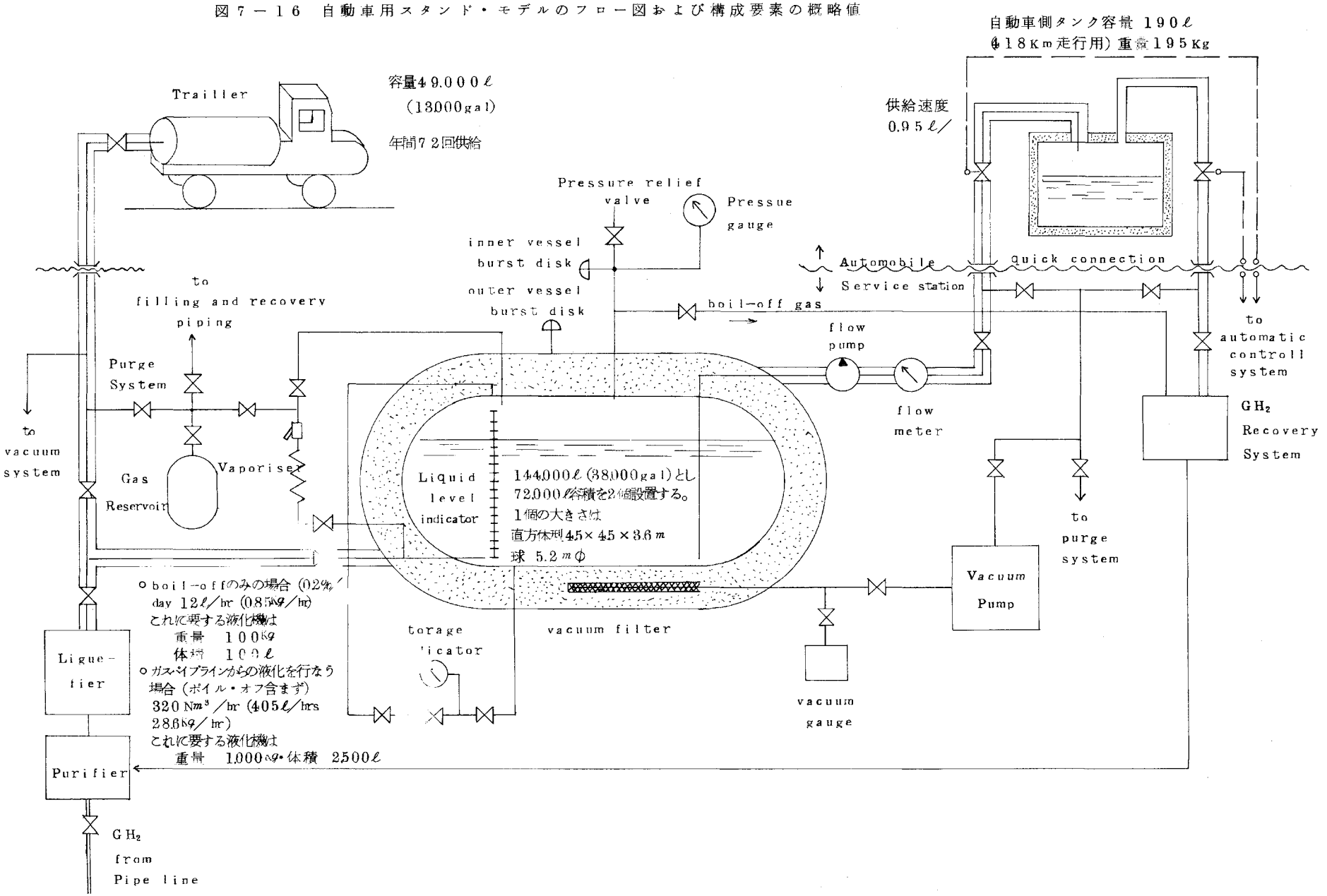
なお，1972年のアメリカでのガソリン・サービス・ステーションの一例は，貯蔵容量15,000gal(56,775ℓ)年間取扱量3.6×10^{5}gal(1,400m^3)，トレーラー供給量は1回8,650gal(32,740ℓ)，年間41回供給となっている。

図7－16には，スタンド・モデルのフロー図とその構成要素の概略値が示してある。

表7－6　自動車への種々の水素の供給法と検討結果

車上貯蔵方式	サービスステーションから自動車への供給方法	サービスステーションまでの供給方法	長　所	短　所	問　題　点
Liquid Hydrogen	タンクごととり替え	トラックなどで定期的に集配	サービスステーションの危険性は小さい	タンク集配の手数，多数のタンクを扱うのが面倒	ステーション，車上，いずれもboil-offが大きな問題となる 対策 車上　空中放出 触媒で燃焼させる 燃料電池用 Metal Hydrideで吸収 ステーション・サイド 再液化 燃料電池利用 タービン駆動
	LH_2そのものを供給	H_2をパイプラインで輸送しステーションで液化する	パイプラインによる都市エネルギーシステムと共存良	液化機を個々に設置するためのコスト上昇あり	
		中央で一括液化し，トレーラーなどで配給	遠隔地でもサービス・ステーションの建設可能	路上輸送による危険性	
Metal Hydride	タンクごととり替え	トラックなどで定期的集配	H_2再結合のとき放出される熱量へ再利用可能	タンク集配の手数 中央基地で多数のタンクを扱うのが面倒	適切な水素放出特性で軽く小容積のM．H．の発見
	各サービスステーションでH_2を供給	H_2はパイプラインで輸送	パイプラインによる都市エネルギーシステムとの共存良	供給の際の待ち時間が長い	
Hybrid System	LH_2とM.H.とのHybrid	LH_2，M.H.と同じ	スタート時の応答性改善 LH_2の蒸発分をM.H.に吸収させることが可能	システムが複雑となる	詳細不明
	異種M.H.のHybrid (e.g.MgH_2とFe-Ti系)	M.H.貯蔵法と同じ	スタート時の応答性改善	システムが複雑になる	
その他	Slush H_2 (液と固体のみぞれ状混合)	LH_2とほぼ同じ	全体の密度がLH_2より約15％高くなる 侵入熱は最初融解熱として吸収される	流動性に不明の点が多い	LH_2法のひとつの変形として興味がある
	合成メタノール	現存のガソリンに類似	現存システムをほとんど変更しなくてよい	大気汚染問題の残存 H_2そのものよりコスト上昇	CO_2を化学的に回収し，炭素源として繰返し使用する

図７－１６　自動車用スタンド・モデルのフロー図および構成要素の概略値



7－7－4　100万人都市用水素ガスの供給導管網設計例

水素の精製，貯蔵，輸送を中心とした水素供給体系の最適システム化設計の一環として，ガス状水素の貯蔵，輸送および分配システムを検討するための資料をうるために西歴2,000年時の100万人都市モデルを想定し，この都市における民生用および工業用燃料需要量を水素ガスに転換した場合の導管網設計（ガスの貯蔵システムを含む）を行なった（資料ガス業界）。

(1)　概　要

(a)　100万人都市モデルにおける供給導管網設計ケース

1）ケースⅠ…都市ガス需要量を水素ガスに転換する場合

2）ケースⅡ…民生用および工業用燃料需要量を水素ガスに転換する場合

(b)　設計手法

1）"都市ガス導管網の輸送能力評価に関する試案"（配管技術16.(10) '74.8参照）

2）"都市ガス導管網の自動設計手法について"（配管技術16.(6) '74.5参照）

(c)　ガス流量計算式

1）高圧および中圧(A)流量

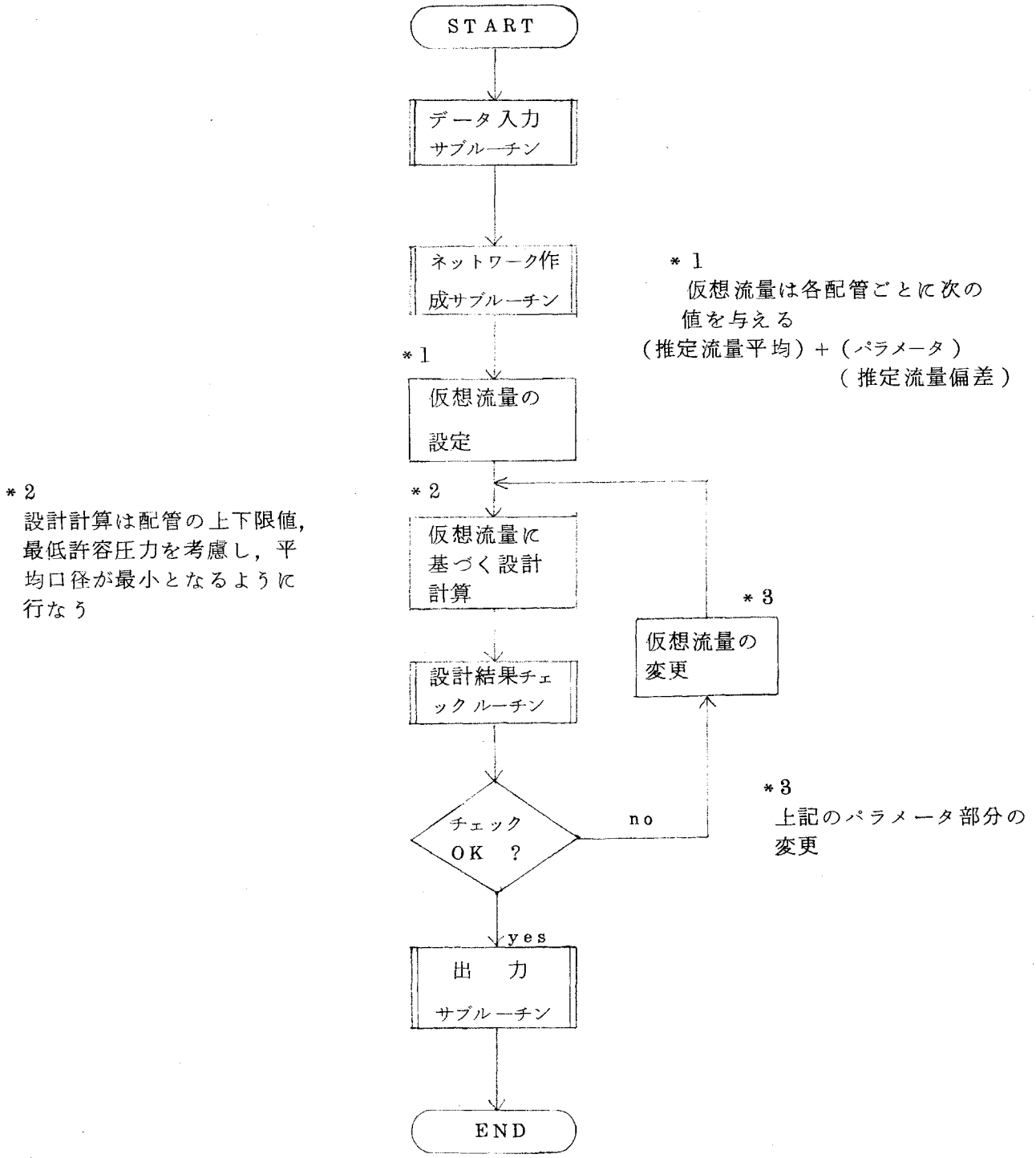
POLYFLOの式　$Q = 20.5\,Re^{0.076}\sqrt{\dfrac{(P_1^2 - P_2^2)D^5}{d \cdot L}}$

2）中圧(B)流量　COXの式　$Q = 52.3\sqrt{\dfrac{(P_1^2 - P_2^2)D^5}{d \cdot L}}$

3）低圧流量　東京ガス方式（設計手法の2）参照）

(2) 設計フロー・ダイアグラム

メインプログラムは次の通りである。



データ入力サブルーチンは，一般項目，ガバナーデータ，配管データ，ノー

ド・データを入力して内部形成に変換する機能，ネットワーク作成サブ・ルーチンは，各ガバナーからの最短ルートを計算し，このルートに添ってメイン配管が割り当てられるようネットワークを構成する機能，計算結果チェックルーチンは，乱数を用いて各ノードの消費量を仮定し流量圧力の決定計算を行なって各ノードの圧力の平均，偏差をとり計算結果をチェックする機能，および出力ルーチンは，パイプ情報（口径，平均流量），ノード情報（平均消費量，平均および下限圧力）を出力する機能をそれぞれ有している。

(3) 都市ガス需要量を水素ガスに転換する場合（ケースⅠ）

(a) 前提条件

水素ガス供給時期…… 2,000年(昭和75年)

モデル都市の規模……人口 100万人

人口密度……25人／ha（2,500人／km²）

（東京瓦斯供給区域人口密度約5,000人／km²）

都市面積……20km×20km（400km²）

都市位置……海岸線の原子力発電所（ガスおよび電気生産地）から100km離れた内陸都市

施設構成……住宅85％　件数割合（25.0万件）

商工業その他15％　件数割合（4.4万件）

(b) 水素需要量の設定

とりあえず，現在の都市ガスの需要量を基盤とし，2,000年時のガス需要構成から需要量を設定，この需要量を水素カロリーに換算したものを水素ガス需要量と設定する。

すなわち，1972年における東京瓦斯のガス販売実績を基準とし，28年後の需要量を推定すると次のようになる。

家庭用……（ガス消費量／需要家1件）×年間伸び率×需要家件数

商工業他…（家庭用ガス消費量／需要家1件）×9倍×年間伸び率×需要家件数

2,000年時の年平均水素ガス需要量

家庭用　3.2m³／日件×2.43×25.0万件＝200万m³／日

（対前年3.2％伸び，実績）

商工業地　3.2 m³／日件 5.28×4.4万件＝670万m³／日

（対前年 6.1 %伸び…総合エネ調，中間報告より設定
GNP弾性値 1.0，1次エネルギー供給量ほぼ下限値）

∴ 2000年時の年平均水素ガス需要量 870万m³／日

(c)　ガスホルダーへのガス貯蔵量と基数

前　提

水素ガスの製造は一次エネルギーを原子力とする水の熱化学法または電気分解法とし，月単位で平均需要量に見合うコンスタント稼動が原子力発電所で可能であるとする。

1.）hourly ピーク期のホルダーへのガス貯蔵量と hourly 操作用ガスホルダー基数

○ 1日の平均消費量より上まわっている消費量の平均消費量に対する割合

25 %（1974. 1. 24北海道ガスの札幌市の消費パターン）

採　用　札幌市のガス消費構成（家庭用 53 %，商業用 38 %，その他 9 %　1972）

図 7 － 16 参照

○ ピーク期の平均ガス消費量

870万m³／日×1.23＝1,070万m³／日

（ピーク月平均ガス消費量／年平均ガス消費量＝1.23）

∴ ホルダーへの必要貯蔵量

1,070万m³／日× 0.25＝270万m³／日

○ ホルダー（中圧）稼動率 75 %

∴ホルダーの必要基数（最大ガス貯蔵量／基 20万m³とする）

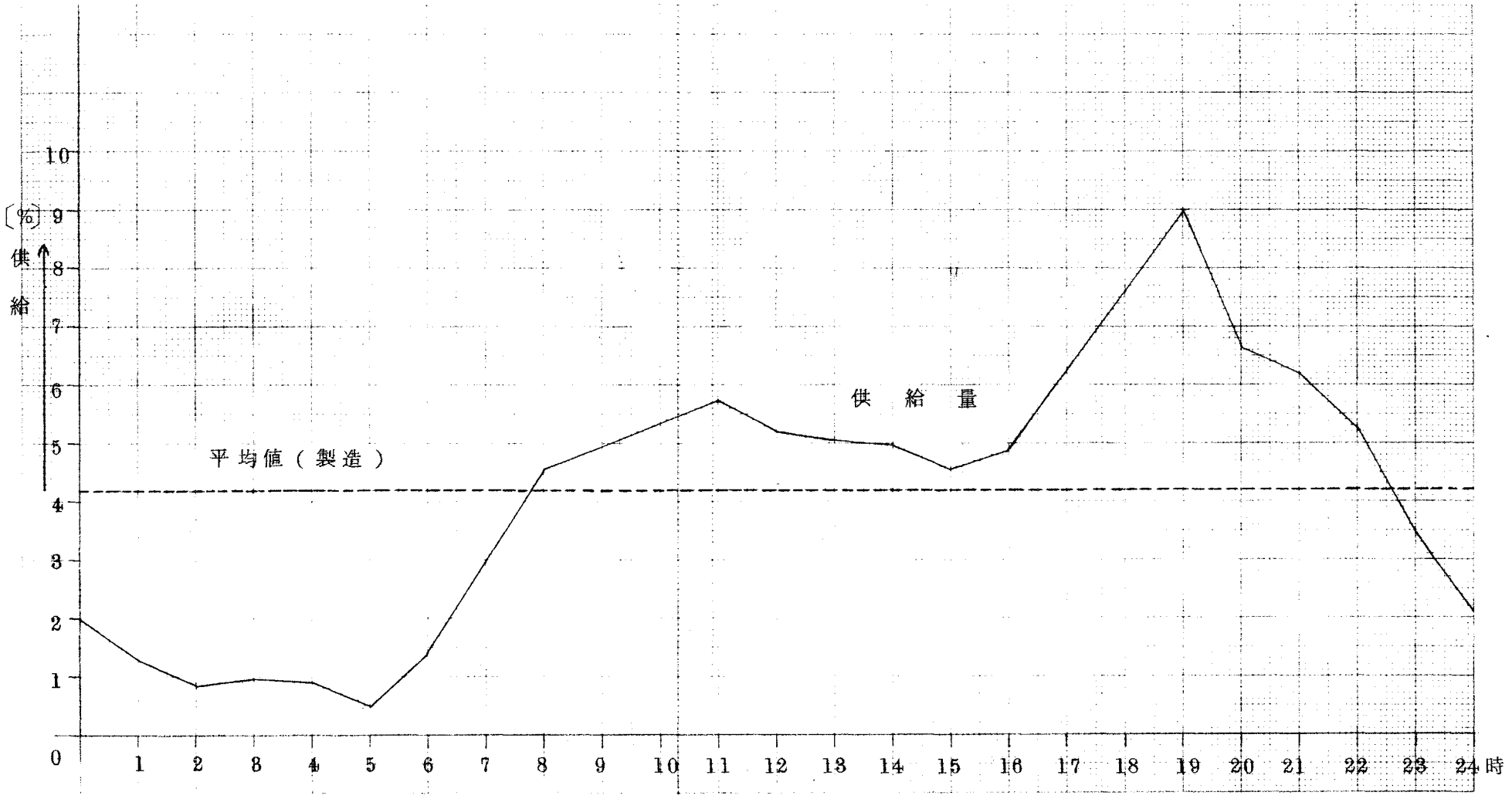
270／0.75×20＝18（基）

○ オフピーク期（4～10月）ホルダー定修用予修ホルダー基数

前　提　ホルダー全基年1回定修実施

ホルダー定修期間……2カ月／基

図 7 － 16' 北海道ガス供給パターン（最大送出日 49. 1. 24）



オフピーク期のホルダー必要基数を次に示す。

4月	850万m³／日	×	0.25／0.75×20	＝15基
5月	840	×	〃	＝14
6月	790	×	〃	＝14
7月	790	×	〃	＝14
8月	770	×	〃	＝13
9月	760	×	〃	＝13
10月	820	×	〃	＝14

ホルダー定修（オフ・ピーク時に行なう）

	4	5	6	7	8	9	10	11
定修基数	3	6	6	6	6	6	3	
実稼動基数(a)	15	12	12	12	12	12	15	
必要基数(b)	15	14	14	14	13	13	14	
(a)－(b)	00	−2	−2	−2	−1	−1	+1	

∴オフピーク期のホルダー定修用予備基数　2基

（予備機の定修はピーク期）

∴ Hourly 操作用のガスホルダー総基数　20基

(2)　monthly のガス需要変動操作用ガス貯蔵量と monthly 操作用ホルダー基数

月別のガス必要貯蔵量＝月別平均ガス需要量（万m³／日）×（月別平均ガス需要量を1.0とし平均ガス需要量を上まわっている係数の累計値＝ガス貯蔵量係数とする）

を次に示す。

	需要量割合	ガス需要量（万m³／日）	ガス貯蔵量係数	必要貯蔵量（万m³）
1月	100	1,020	1.314	1,340
2〃	95	1,070	0.869	930
3〃	90	920	1.381	1,270
4〃	86	850	1.596	1,360
5〃	82	840	0.834	700
6〃	80	790	0.709	560
7〃	77	790	0.996	790
8〃	75	770	1.121	860
9〃	76	760	1.307	990
10〃	80	820	1.189	970
11〃	86	850	1.752	1,490
12〃	93	950	0.798	760
平均	85	870		12,020

ここでは東京瓦斯の1973 1−12の実績係数を採用（図7−17参照）した。

∴ Monthlyの操作用ガス貯蔵量は 1,360＋1,490＝2,850万m³

∴このMonthlyのガス貯蔵を低温タンクで貯蔵するとして，その必要基数は，稼動率80％，一基あたりの最大低温，球型タンク（NASAケネディ宇宙センターのLH_2 3,400 kℓ）で備蓄するとして，

$$2{,}850\times10^4/850\times3{,}400\times0.8=12.4\rightarrow 13(基)$$

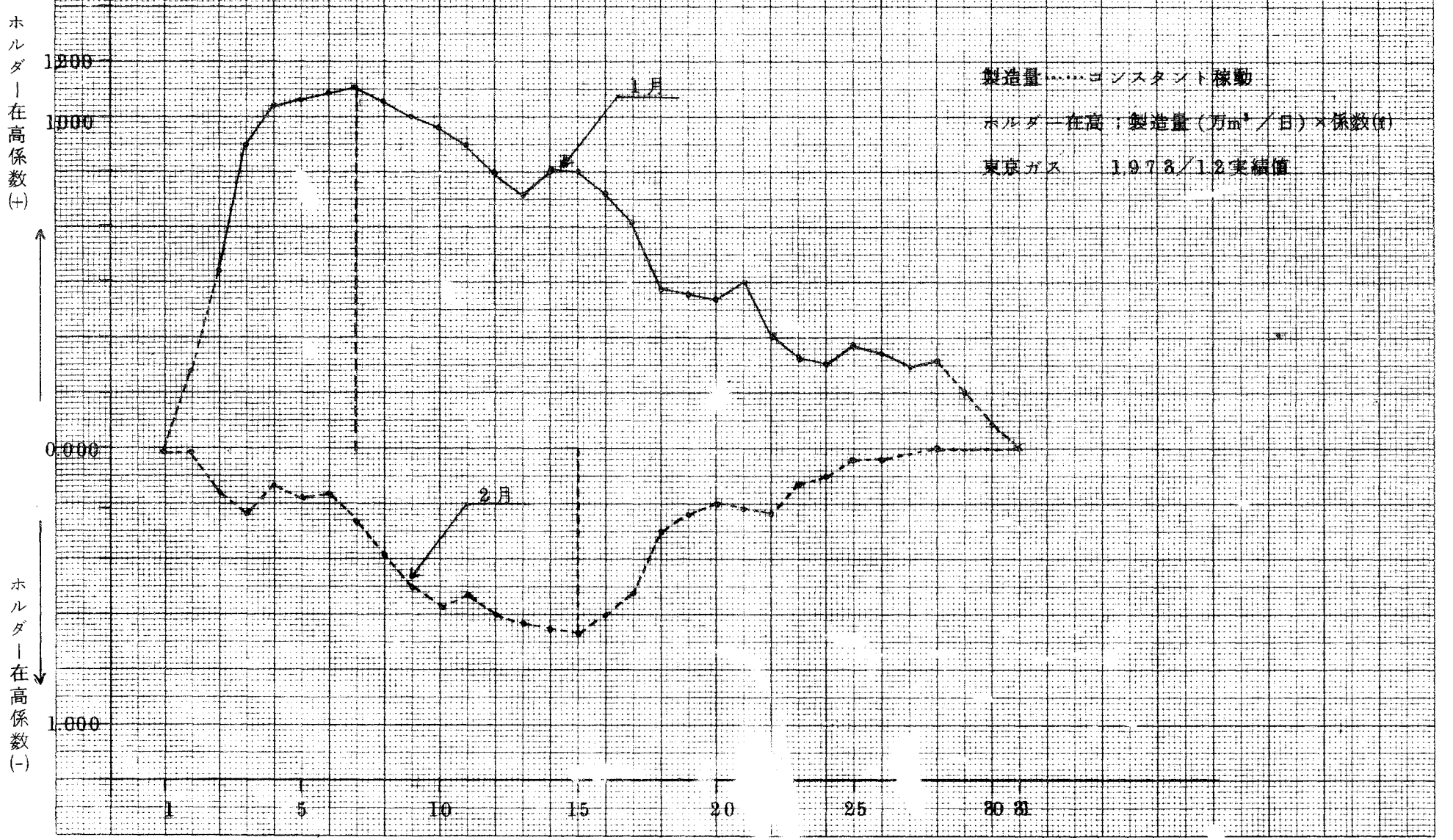
(d) 供給導管網設計のための前提条件

1）ピーク月，ピーク日のガス消費量（最大値）および用途別土地面積を次に示す。なお，1300万m³／日は1,070万m³／日×1.2から求めた。

	最大ガス消費量（万m³／日）	土地面積（km²）
工場(1)	260	18
〃 (2)	130	10
〃 (3)	130	8
大学等教育施設	80	12
都心	200	16
住宅	300	100
商業	200	
合計	1,300	164

（都市全域の面積 400 km²）

図7－17　ピーク期のホルダー在高状況図（1例）

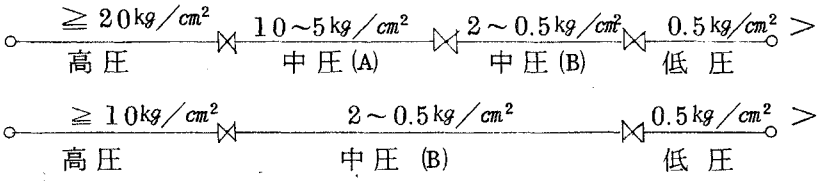


2）ガスホルダーの操業条件

最大貯蔵量　20万m^3／1基（最大圧力10.0kg／cm^2G）

基　数　20基（5ステーション），稼動率75％

3）ガスの供給方式



4）ガスの時間別供給割合

表7－7に示す。なお，時間別消費割合は札幌のパターンを採用した。

(e)　低圧ガバナー（整圧器）の基数計算

1）住宅商業地区

東京ガスの住宅商業地区における需要家件数と低圧ガバナー数の実績関係（需要家件数3000件に対し低圧ガバナー1基）からモデル地区の低圧ガバナー基数を求める。

○低圧ガバナー基数　$\frac{294,000(件)}{3,000(件／基)} \rightarrow \underline{100(基)}$

住宅商業地区の需要家分布が均一であるとすると，

○低圧ガバナー1基あたりの供給分担面積　$\frac{100(km^2)}{100(基)} = 1(km^2／基)$

2）都心地区

低圧ガバナーの能力を6,500m^3／hr／基とし，ピーク時間帯（18－19時）のガス消費量（200万×0.09＝18万m^3／hr）に対応する低圧ガバナー基数を求める。

○低圧ガバナー基数　$\frac{180,000(m^3／h)}{6.500(m^3／h／基)} = 27.7 \rightarrow \underline{28(基)}$

住宅商業地区と同様都心地区の需要家分布が均一であるとすると，

○低圧ガバナー1基あたりの供給分担面積

$$\frac{16(km^2)}{28(基)} = 0.57(km^2／基)$$

表７－７　ガスの時間別供給割合

（各需要先とも同一パターンとする）

	時間別供給割合（%）	ガス供給量（$10^4 m^3$）	ホルダー受入量（$10^4 m^3$）	ホルダー送出量（$10^4 m^3$）	ガス製造量（$10^4 m^3$）
1	1.25	16.2	37.8		54.0
2	0.78	10.1	43.9		〃
3	0.95	12.3	41.7		〃
4	0.89	11.5	42.5		〃
5	0.48	6.2	47.8		〃
6	1.36	17.6	36.4		〃
7	2.88	37.3	16.7		〃
8	4.45	57.7		3.7	〃
9	4.79	62.1		8.1	〃
10	5.26	68.2		14.2	〃
11	5.66	73.4		19.4	〃
12	5.17	67.0		13.0	〃
13	5.05	65.4		11.4	〃
14	4.99	64.7		10.7	〃
15	4.58	59.4		5.4	〃
16	4.87	63.1		9.1	〃
17	6.18	80.1		26.1	〃
18	7.66	99.3		45.3	〃
19	9.06	117.4		63.4	〃
20	6.68	86.6		32.6	〃
21	6.24	80.9		26.9	〃
22	5.26	68.2		14.2	〃
23	3.48	45.0	9.0		〃
24	2.03	26.3	27.7		〃
計	100.00	1,296.0	303.5	303.5	1,296.0

3) 大学等地区

都心地区と同じく低圧ガバナーの能力を 6,500m³/h/基とすると，

○低圧ガバナー基数

$$27.7 \times \frac{80 \times 0.0906}{18} = 11.1 \rightarrow \underline{12(基)}$$

○低圧ガバナー1基あたりの供給分担面積

$$\frac{8\,(km^2)}{12(基)} = 0.67\,(km^2/基)$$

4) 工場地区

工場地区への供給は中圧(B)とし，低圧ガバナーに相当する消費地点数を次のように設定する。

工場(1)	18 地点	(1 地点平均使用量	13.0 千m³/ピーク時	)
(2)	27 〃	(〃	4.3 〃	)
(3)	21 〃	(〃	5.6 〃	)
計	66 地点			

∴低圧ガバナーの全基数は 206 基（うち 66 地点の中圧(B)供給を含む）となる。以上をまとめて需要区分およびガバナー取付位置を図 7－18 に示す。

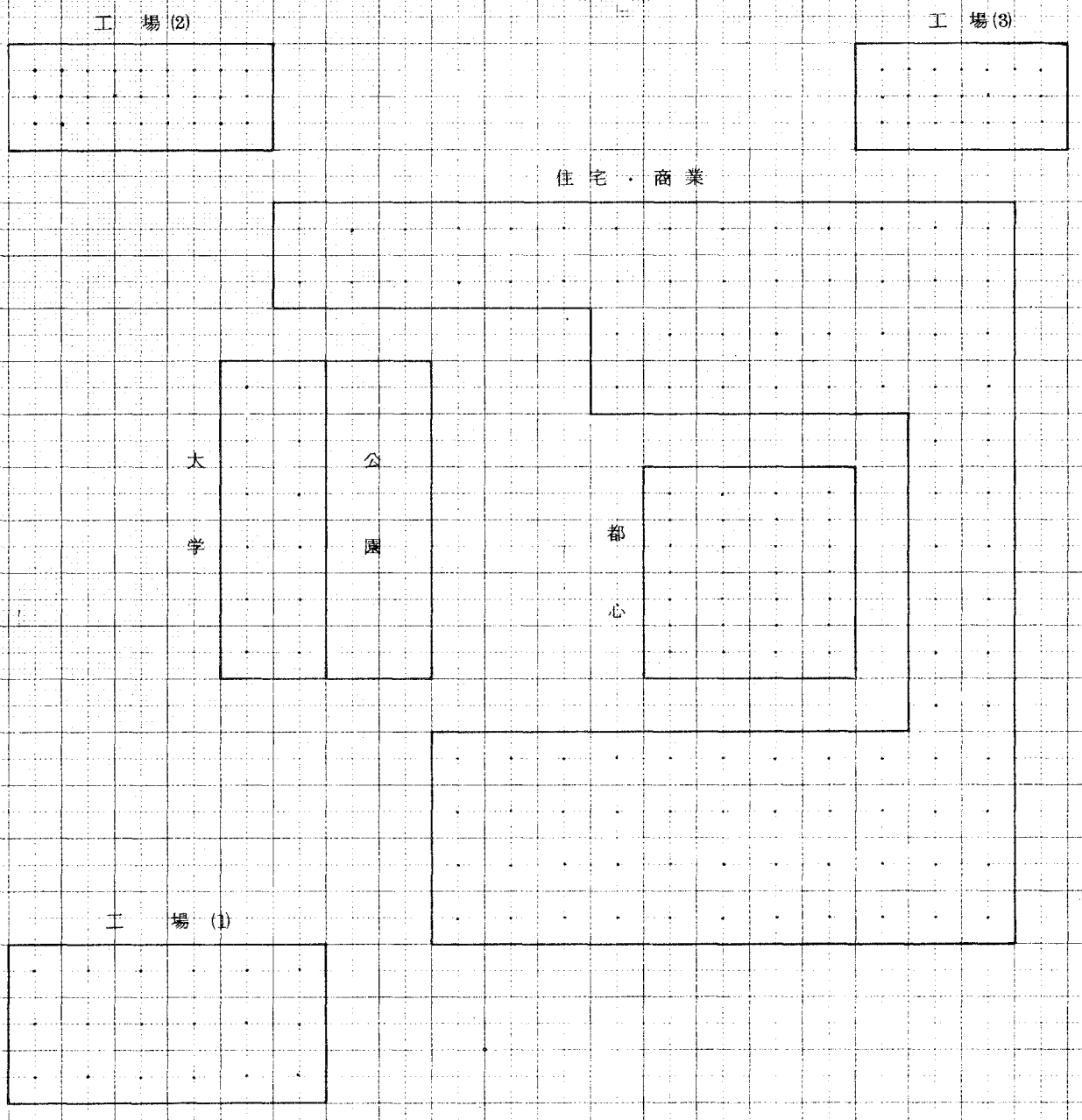
(f) 中圧(B)供給導管の設計

1) 設計のための前提条件

○低圧ガバナー（ 66 地点の中圧(B)供給含む ）1基あたりの最大送出量（ピーク時間帯）を次に示す。

地区名	ガバナー基数	最大ガス送出量（$10^3 m^3/h$/基）	各地区単位の最大ガス送出量($10^3 m^3/h$)
工　場(1)	18	13.0	234.0
〃　(2)	27	4.33	117.0
〃　(3)	21	5.57	117.0
大学等	12	6.00	72.0
都　心	28	6.45	180.6
住宅商業	100	4.52	452.0
計	206		

図 7－18　需要区分およびガバナー取付位置



・印はガバナー位置を示す。

○ 中圧(B)供給導管を図７－１９のように配管し，上表のガス送出量を消費量とし，送出圧力を 2.0kg/cm², 末端圧力を 0.5kg/cm² として設計した。

２）中圧(B)供給導管網設計結果

結果を次表に示す。

導管口径（インチ）	本　　数	延　長　（m）
6	61	48,500
8	50	40,000
12	80	73,000
16	30	32,500
20	13	16,000
24	6	11,000
計	240	221,000

平均口径　11.72 インチ

図７－２０に中圧Ｂ供給導管網設計結果を示す。

以上の結果は供給方式Ｃ－１，Ｃ－２の設計に共通な項目である。

(g)　Ｃ－１（高圧－中圧(A)－中圧(B)－低圧）供給方式の設計

１）中圧(A)供給導管網設計

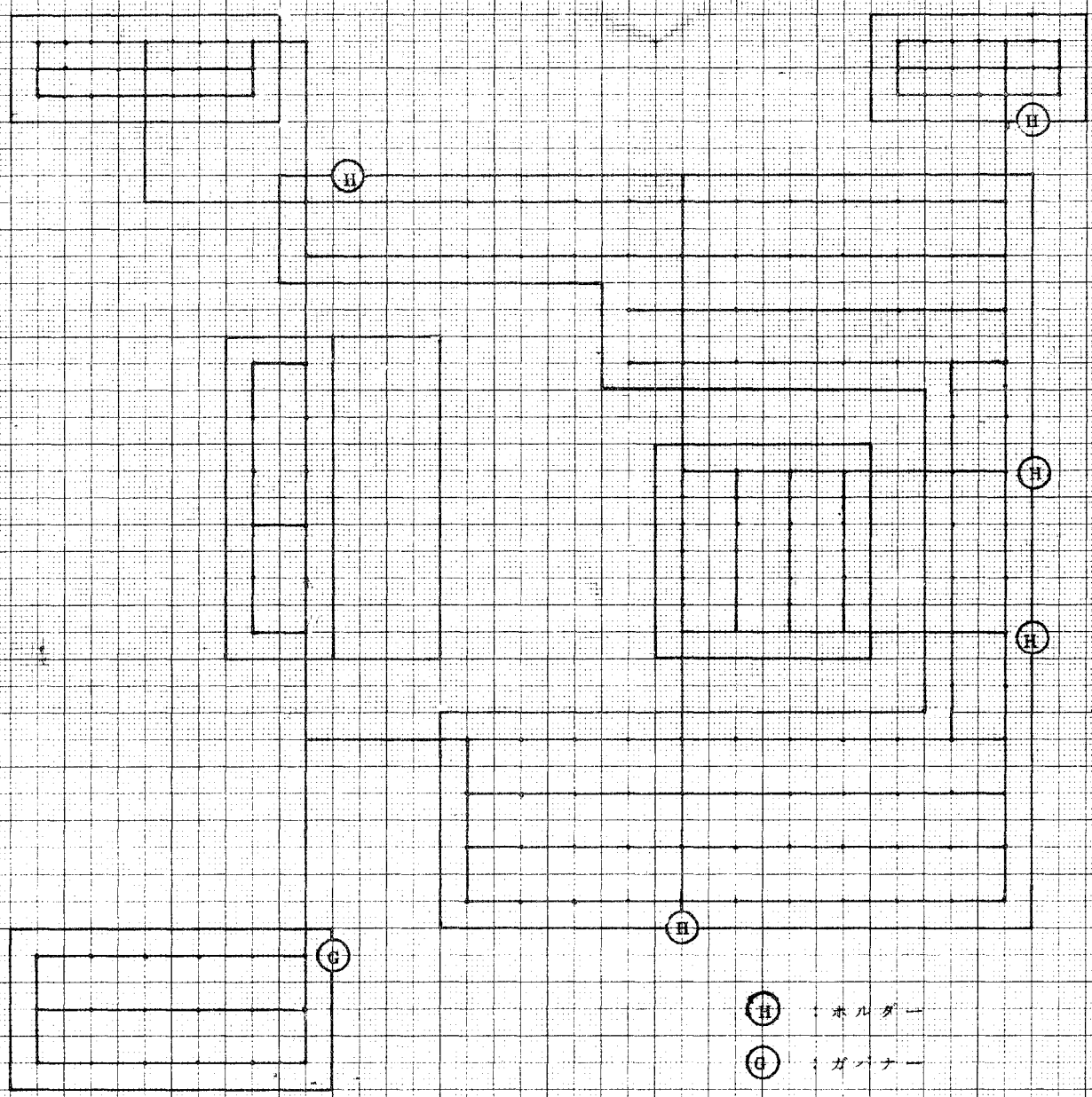
(i)前提

○ 中圧(B)供給導管網設計結果からピーク時間帯の中圧(B)送出点の送出流量は次の通りとなる。

（各ノード番号の位置は図７－２１の中圧(A)供給導管網図を参照）

ノード番号	最大ガス送出量（$10^3 m^3/h$）
A	174.0
B	129.0
C	188.0
D	172.0
E	258.0
F	253.0
計	1.174.0

図7－19 ガス配管ルート図



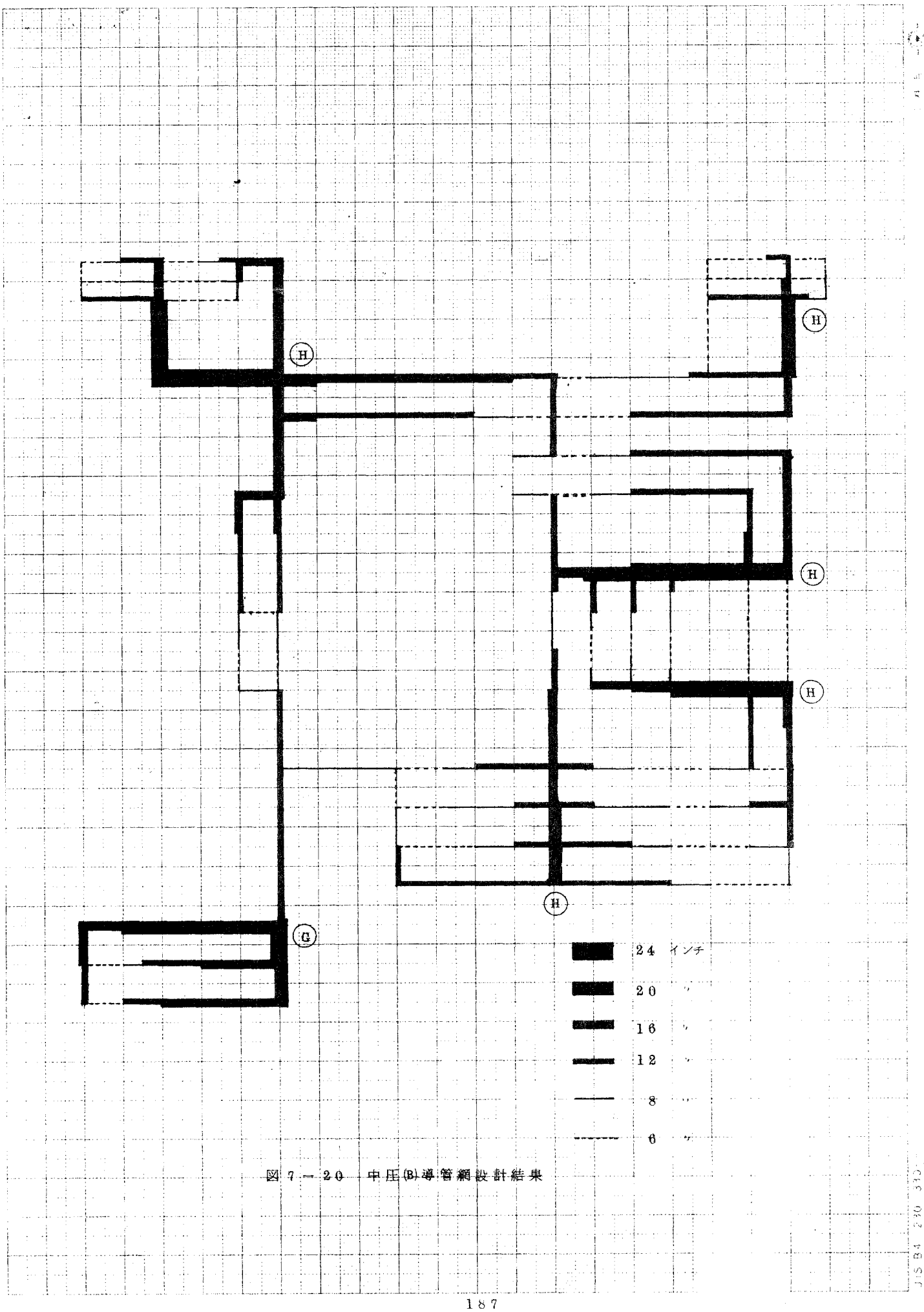


図 7 － 20　中圧(B)導管網設計結果

上表からピーク時間帯のホルダーからの送出流量 - 63.4万m^3/h（表7－7参照）を各ノード（ノードFはガバナーのみ）に振り分けたホルダーから中圧(B)ラインに供給することにより，中圧(A)ラインからの送出流量が得られる。これを次表に示す。

ノード番号	ホルダー基数	ホルダー送出量（$10^3 m^3$/h）	中圧(B)送出点の送出量（$10^3 m^3$/h）	中圧(A)送出流量（$10^3 m^3$/h）
A	3	95.1	174.0	78.9
B	3	95.1	129.0	33.9
C	5	158.5	188.0	29.5
D	4	126.8	172.0	45.2
E	5	158.5	258.0	99.5
F	0	0.0	253.0	253.0
計	20	634.0	1,174.0	540.0

上表から中圧(A)供給導管網からの送出量を基に，中圧(A)供給導管網送出圧力10kg/cm^2，末端圧力5kg/cm^2として設計した。

(ii) 中圧(A)供給導管網設計結果

○口径別延長および平均口径を次表に示す。（図7－21参照）

口径（インチ）	本数	延長(m)
12	2	10,000
16	3	17,000
20	2	26,000
計	7	67,000

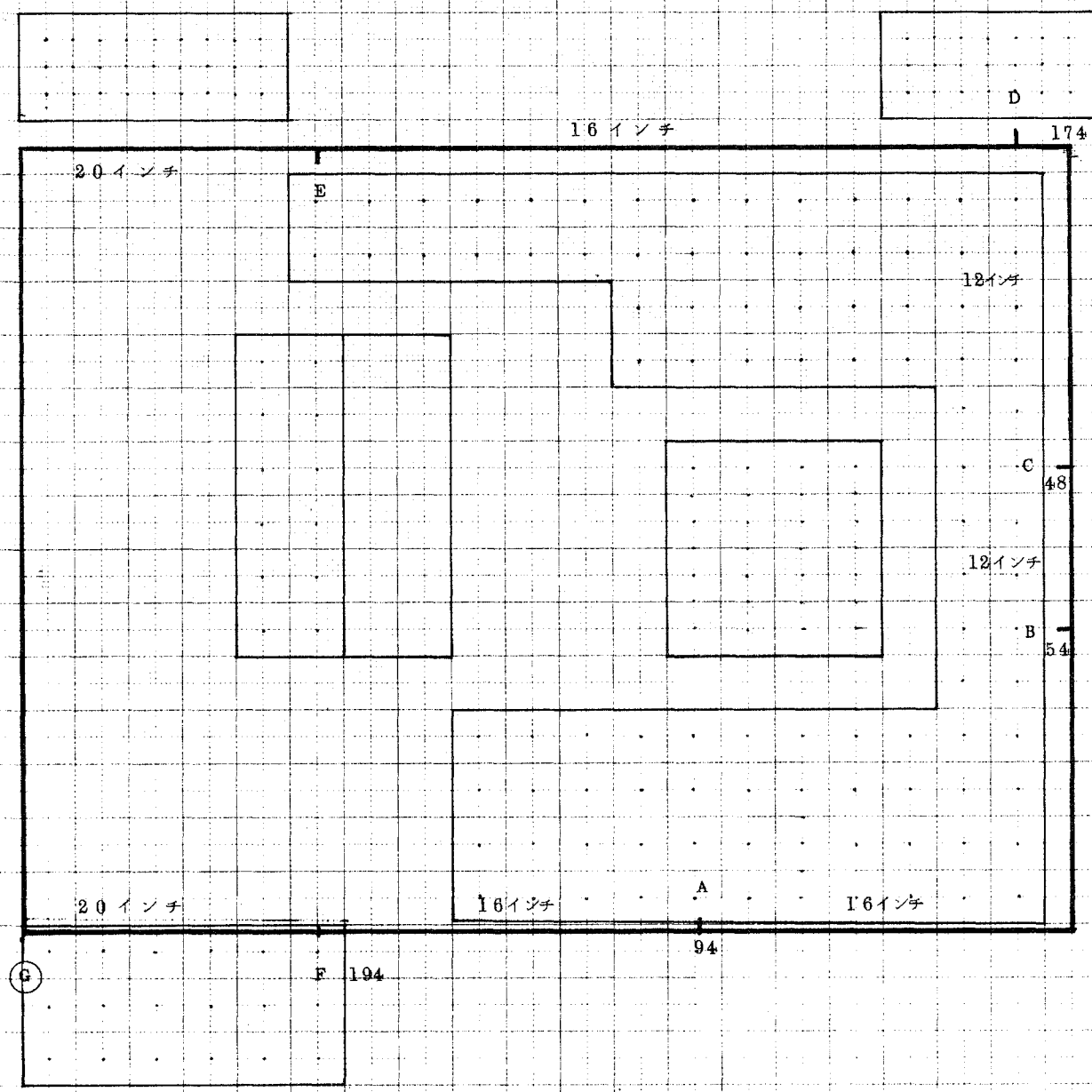
平均口径

16.96（インチ）

○各ノード地点における圧力解析を次表に示す。

ノード番号	送出点圧力（kg/cm^2）
A	5.57
B	5.40
C	5.40
D	6.49
E	7.61
F	6.89
G	10.00

図 7 − 21　中圧(A)導管網図



2）高圧供給導管設計

(i)前　提

○水素ガス製造工場から消費地の中圧(A)ラインまでの距離100km

○ガス供給量1300万m^3／日（54.2万m^3／h）

(ii)工場送出圧力の決定

次表から送出圧力50kg／cm^2，パイプ口径20インチと決定した。

工場送出圧力	口径（インチ）	ステーション着圧
30 kg／cm^2	30	24,7 kg／cm^2
40	24	27,2
50	20	22,8
50	24	40,4
60	20	38,7

(h)　C－2（高圧－中圧(B)－低圧）供給方式の設計

1）高圧供給導管網設計

高圧供給導管網の設計に必要な高圧供給ラインからの中圧(B)供給ラインへの送出量は，中圧(B)供給導管網設計結果から(g)－1）－(i)の中圧(A)送出流量と同じである。

(i)前　提

この中圧(A)送出流量を用いて，高圧供給導管網の末端圧力を10kg／cm^2としてパイプの口径および延長を計算した。

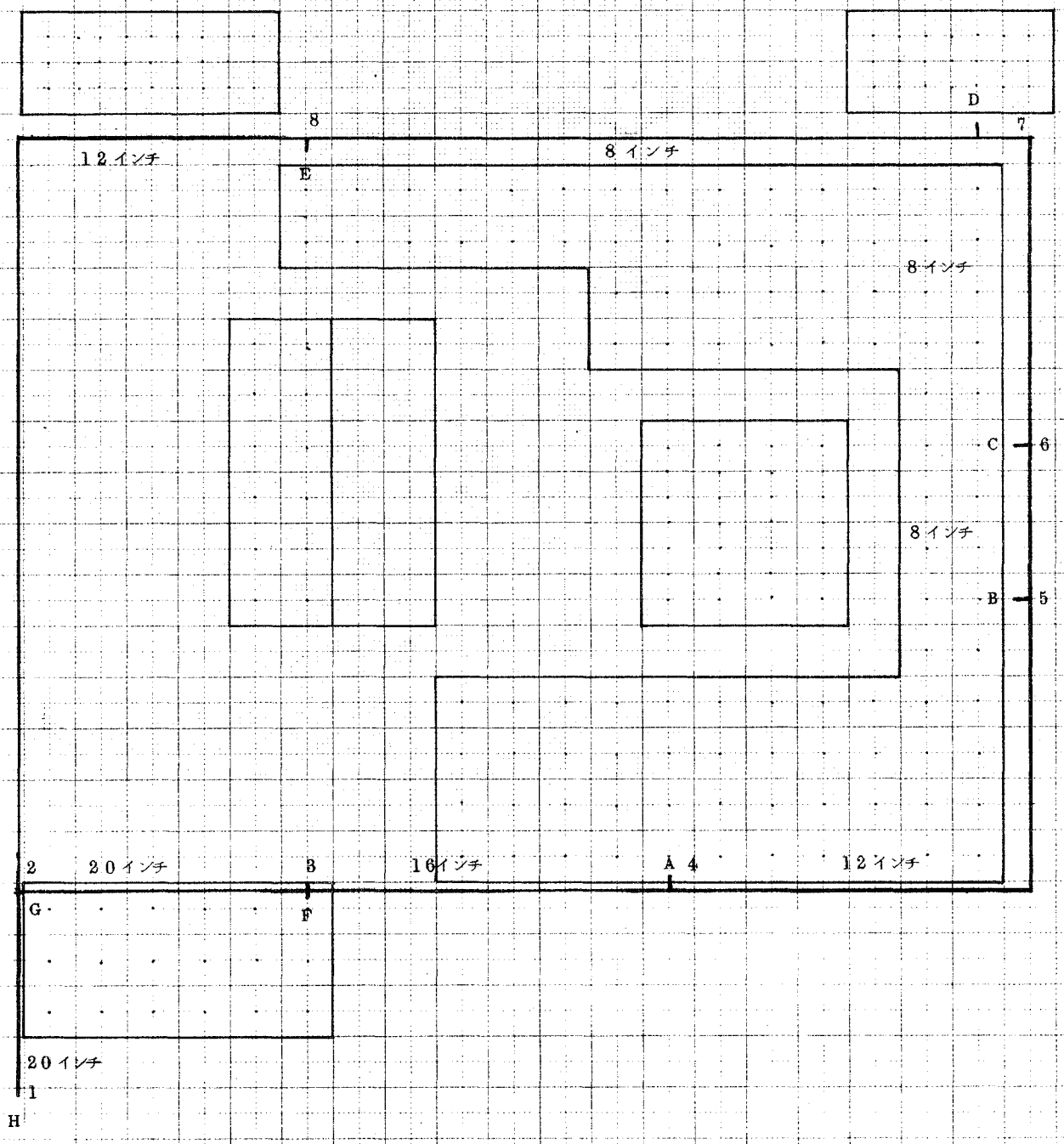
(ii)設計結果

○口径別延長および平均口径を次に示す。（図7－22参照）

口径（インチ）	本　数	延　長（m）
6	—	—
8	3	23,000
12	2	31,000
16	1	7,000
20	2	106,000
計	8	167,000

平均口径16.69インチ

図7－22　高圧導管網図


D
7
8
12インチ
8インチ
E
8インチ
C
6
8インチ
B
5
2
20インチ
3
16インチ
A 4
12インチ
G
F
20インチ
1
H

○各ノード地点における圧力解析を次に示す。

ノード番号	圧　力（kg／cm²）
A	17.77
B	15.45
C	13.36
D	12.16
E	13.54
F	18.91
G	20.44
H	50.00

(i)　低圧供給導管網設計

ガバナー1基に対する必要導管延長と必要平均口径を計算し，低圧導管の口径配分を行なう。

○必要導管延長（L）算定式

$$L = K_1 \cdot n \cdot \rho^{-1/2} \qquad (m) \cdots\cdots\cdots\cdots ①$$

K_1 ：係数（188.3…東京瓦斯で採用している数値）

n　：件数／ガバナー1基

ρ ：単位面積あたりの件数（件／km²）

○必要平均口径（D）算定式

$$D = K_2 \cdot q^{2/5} \cdot n^{3/10} \cdot \rho^{-1/10} \qquad (mm) \cdots\cdots\cdots\cdots ②$$

K_2 ：係数（26.46…東京瓦斯で採用している数値）

q　：5,000Kcal換算ガス需要量（m³／h／件数）

n　：件数／ガバナー1基

ρ ：単位面積あたりの件数（件／km²）

○計算結果を次に記載する。

(i)　住宅商業地区

$$L = 188.3 \times 3000 \times (3,000)^{-1/2} = \underline{10,313(m)}$$

$$D = 26.46 \times \left(\frac{4,520}{3,000} \times \sqrt{\frac{0.07}{0.6}}\right)^{2/5} \times (3,000)^{3/10} \times (3,000)^{-1/10}$$

$$= \underline{100.6mm}$$

以上の数値を基に東京瓦斯供給区域のうち1地区の導管網をモデルにして導管網の本管口径配分を行なった。これを次に示す。

口径（インチ）	導管延長（m／1基）	口径別総延長（m）
2	4,090	409,000
3	2,007	200,700
4	1,548	154,800
6	1,200	120,000
8	1,090	109,000
12	378	37,800
計	10,313	1,031,300

○本管，支管を含めた総延長

本管の延長は実績値として本管の総延長とほぼ等しいと見なせるので，支管を2インチとすると本支管の口径別総延長は次のようになる

口径（インチ）	口径別総延長（km）
2	1,440.3
3	200.7
4	154.8
6	120.0
8	109.0
12	37.8
計	2,062.6 km

(ii) 都心地区

○都心地区の用途を商業用とし，ガバナー1基に対する需要家件数に東京瓦斯の実績値を用い，LおよびDを求めた。

n：885件／ガバナー1基

①式から $L=188.3\times885\times\left(\frac{885}{0.57}\right)^{-1/2}=\underline{4,230\,(m)}$

②式から $D=26.46\times\left(\frac{6,450}{885}\times\sqrt{\frac{0.07}{0.6}}\right)^{2/5}\times(885)^{3/10}\times\left(\frac{885}{0.57}\right)^{-1/10}$

$=\underline{140.6\,(mm)}$

以上の数値を基に都心地区の低圧導管網の口径配分を行なうと次のようになる。

口径（インチ）	導管延長（m／1基）	口径別総延長（km）
2	0	0
3	0	0
4	2,350	65,8
6	1,000	28,0
8	650	18,2
12	230	6,4
計	4.230	118,4

○住宅・商業地区と同様に支管の総延長を本管の総延長と同じとして，本支管の口径別延長を求める。

都心地区本支管口径別総延長は次の通りである。

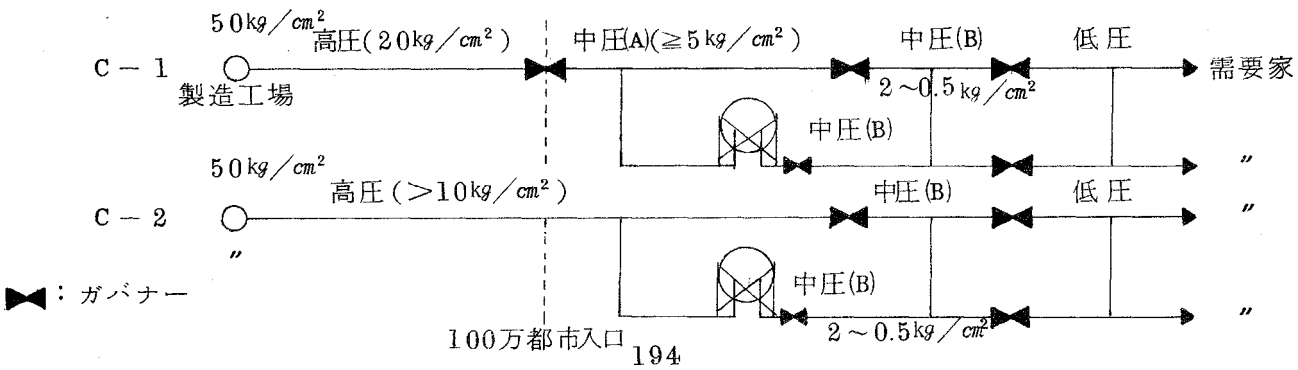
口径（インチ）	口径別総延長（km）
2	118.4
3	0
4	65.8
6	28.0
8	18.2
12	6.4
計	236.8

(4) ケースIのまとめ

ケースIの結果をまとめて表7－8に示す。ここではC－1とC－2というガス供給方式別の口径別総延長の比較が示されている。

表7－8　ガス供給方式別の口径別総延長比較（ケースI）

下記のガス供給方式別の口径別総延長比較



（単位－km）

供給方式 / 圧力 / 口径(インチ)	C－1.（高圧－中圧(A)－中圧(B)－低圧）				C－2.（高圧－中圧(B)－低圧）		
	高　圧	中圧(A)	中圧(B)	低　圧	高　圧	中圧(B)	低　圧
2	—	—	—	1,558.7		—	1558.7
3	—	—	—	200.7		—	200.7
4	—	—	—	220.6		—	220.6
6	—	—	48.5	148.0		48.5	148.0
8	—	—	40.0	127.2	23.0	40.0	127.2
12	—	10.0	73.0	44.2	31.0	73.0	44.2
16	—	17.0	32.5	—	7.0	32.5	—
20	100.0	26.0	16.0	—	106.0	16.0	—
24	—	—	11.0	—	—	11.0	—
小計	100.0km	67.0km	221.0km	2,299.4km	167.0km	221.0km	2,299.4km
平均口径	20.0インチ	16.96インチ	11.72インチ	3.06インチ	16.18インチ	11.72インチ	3.06インチ
GH_2ホルダー	最大貯蔵能力 20万m^3／基×20基				同　左		
LH_2タンク	〃　3400m^3／基×13基				同　左		
ガバナー	高圧　1基	中圧　26	低圧 206基		高圧　6	中圧　20	低圧 206基

(5)　民生用および工業用燃料需要量を水素ガスに転換した場合（ケースⅡ）

前提条件を次に示す。

1）ピーク月，ピーク日のガス消費量（最大値）

	最大ガス消費量（×10^6 m^3／日）
工　場(1)	10.0
〃　(2)	5.0
〃　(3)	5.0
大学等施設	2.9
都　心	8.9
住宅地	11.8
合　計	43.6

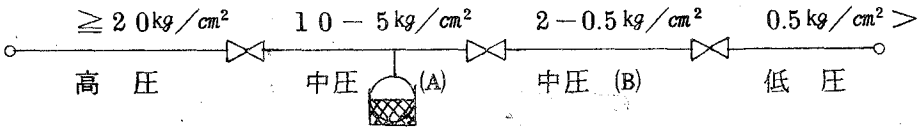
2）ガスホルダーの操業条件

最大貯蔵量　　20万m³／基（最大圧力 10.0kg／cm² G）

基　　数　　44基（9ステーション）

稼　動　率　　75％

3）ガス供給方式（4段階方式）



なお，各地区のガス消費量の推定に用いた前提条件，時間別供給割合，設計のためのその他の条件，および中間の計算結果はその手順がケースIと類似のため本報告では割愛させて戴く。

表7－9　ケースIとケースIIの比較

ケースI……都市ガスの需要量を水素ガスに転換した場合

ケースII……民生および工業用燃料需要量を水素ガスに転換した場合

	C－I				C－II			
ガス需要量	870万m³／日				3,610万m³／日			
平均需要量／ピーク時需要量	(日間ベース) 81.3％				91.2％			
GH_2 ホルダー LH_2 タンク ガバナー	20万m³／基×20基 3,400Kℓ／基×13基 高圧 1	中圧 26	26	低圧 206	20万m³／基×44基 3,400Kℓ／基×23基 高圧 1	中圧 27		低圧 206
	高　圧	中圧(A)	中圧(B)	低　圧	高圧	中圧(A)	中圧(B)	低　圧
2インチ				1558.7				1149.7
3				200.7				161.1
4				220.6				343.1
6			48.5	148.0			53.0	299.7
8			40.0	127.2		17.0	11.0	189.7
12		10.0	73.0	44.2		15.0	67.5	138.5
16		17.0	32.5	—		52.5	56.0	17.6
20	100.0	26.0	16.0	—		26.0	25.5	—
24			11.0	—		24.0	8.0	—
30			—	—	100.0	—	—	—
小　計	100.0	67.0	221.0	2299.4	100.0	134.5	221.0	2299.4
平均口径	20.0	16.96	11.72	3.06	30.0	16.74	12.73	4.09

(6) ケースⅠとケースⅡの比較

ケースⅡの結果をケースⅠのC－1と比較して表7－9に示した。

7－8 水の分解からの副生酸素について

水素のエネルギーシステムのうち水の分解による水素製造を基本とするシステムにおいては副生酸素の問題がたえずつきまとう。特に将来の核融合による大規模な水の直接分解においては，水素の需要に見合う化学量論的な酸素をどうとりあつかうかは深刻な問題となる。

酸素製鋼との関係がすぐうかぶのは当然のことながら，これに加うるにたとえ下水処理用酸素を考えたとしても運搬コストという点で行きづまる。距離の点で製造基地の立地に大きな制約が加わるからである。計算すればすぐわかることだが，膨大な酸素量となるので新たな思考が必要となろう。

1）工業用酸素をすべてこれにおきかえる手段を考える。すなわち，水素製造基地に酸素大量消費産業を立地させる。それ以外には酸素を発生させず，従って他の需要は電力で調達する。この場合は製造基地の大規模化が制約されよう。

2）水から得られたものは水へかえす，すなわち，たえず水素とコンビを組ませ，支燃剤はたえず酸素とする。燃焼すれば水になるのだから，用水の供給にもなり又凝縮潜熱を利用しうる。家庭などでコックをひねれば酸素が出るというのはこのケースにあたる。しかしながら，この場合，酸素－水素炎の制御（特に民生用，商業用），酸素と水素のコンビ輸送の安全性の問題などがある。

3）燃焼による大気への影響に関しては，大きなスケールで考えれば，一方で空気を支燃剤として用い空気中の酸素を消費し，他方で副生酸素を大気に供給すればマクロな酸素バランスはたもたれる（もっとも大気中の酸素濃度そのものは人類によってはほとんど影響をうけないが）。

従って副生酸素は大気へ放出するという考え方がある。ただし，酸素の工業的有効利用による水素製造コストの低減化は工業用に可能な一部をのぞいてはのぞみえず，又窒素を加熱する分だけのエネルギー損失（大気への熱放散共）がたえず伴なうことになる。

4）炭酸ガスリサイクルに関与させる。すなわち，電力を別にすれば代替燃料として中期的には化石燃料があるけれども，長期的にはそれが激減した場合に植物，生体関係廃棄物が考えられる。木材を始めとするこの植物は，空気中のわずかな炭酸ガスを固定し，循環しうる唯一の貴重な炭素源であるので将来は特に注目せねばならないが，この植物という代替燃料の支燃剤として酸素を用い，有効に消費することである。この場合の酸素は，燃料による酸素の消費，炭酸ガスと水の発生，および植物の光合成による炭酸ガスと水の消費・酸素発生という炭酸ガスリサイクルに関与させることになる。ここでは植物燃料が将来どの程度可能かを環境安全性を含めて調査する必要があるが，要するこの分だけ酸素を水素とは別個に熱的に利用することになる。

その他種々の考え方があるのであろうが，これはいずれも水素エネルギー・システムのみで解決しうるものではなく，少なくとも他のエネルギー産業，種々の工業，農林漁業などに関係する視野の広い話となるので，ここでは単に問題提起にとどめることにした。

§8　研究開発の重点項目

8－1　システム・ソフト・ウエア

8－1－1　必要な技術

サン・シャイン計画の一環として，安全性を基本とした水素に関する精製・液化・貯蔵・輸送・安全制御等の安全供給体系を確立する目的で本項を提案した。

水素の発生から利用までのフロー・ダイアグラムの一例を図8－1に示したが，こゝでは特に液体水素を例にとつて開発しなければならない要素をフトワクで示した。この実用化に必要不可欠な水素の取扱いのための技術的な安全基準案を，研究開発の各段階で提起される問題点とその対策にもとずき，検討・作成する作業が必要であり，その骨子となるのはシステム・ソフト・ウエアである。水素の安全供給体系というシステム・ソフト・ウエアは次の各技術から成り立つことが考えられる。勿論これら，ソフト・ウエアにはハードウエアによる技術的なバック・アップを必要とする。

(a)　気体水素の精製技術・純度管理技術

(b)　気体水素の液化・気体および液体水素の貯蔵を主体とする低温システムおよび最適制御技術

(c)　気体および液体水素の輸送・分配を主体とする輸送システムおよび最適制御技術

(d)　気体水素・液体水素の計測制御技術

(e)　事故回避用解析技術・安全制御技術

(f)　MHに関する同上の技術

(g)　上記(a)～(f)を主体とする水素安全供給体系用設計基準および安全実用設計コード

(h)　水素安全供給体系の安全性管理技術とこれに基づく実用化のための技術的な安全基準

8－1－2　研究・開発における問題点

クリーン・エネルギーとしての水素の有効性，必要性はすでにサン・

シャイン計画で指摘され，取り上げられているが，これの供給体系の具体化にあたつては，詳細な検討のもとに効果的に研究開発がすすめられなければならない。

この具体化のためには，種々の技術的問題が存在する。まず水素の精製・液化・貯蔵・輸送分配等の安全供給体系を1つのシステムとして位置付けし，更に常圧水素・高圧水素・液体水素・MHの組合せによる代替案の最適化をめざし詳細する必要があり，これらは個々に取扱かわれるべきものではない。すなわちこれらのシステムの代替案を総合評価して最も安全性の高い合理的なシステムを撰択すべきである。次いで撰択されたシステムの実現のために要求される各要素の現状を調査し，システムの目的に合致するに必要な研究開発を行う必要がある。

これらの要素の中で技術的に特に問題となるのは，水素の純度管理・液化・貯蔵・輸送・分配に関する低温技術およびMHであり，基本的な問題としてOrtho-Para変換熱，ハイドロ―リックス，伝熱，合理的な熱力学サイクルの選択，低温材料の強度，耐蝕性，低温脆性等の性能試験，計測制御技術，大型化に伴なう問題としては断熱技術，周辺機器，それらの保守管理技術，信頼性の問題などがある。

液体水素は沸点20.4°K の極低温状態であり断熱のわずかな不良による外部からの熱侵入によつて蒸発し，その時体積が約850倍に膨脹する上，更に可燃性であつて，その燃焼範囲が4.1～74.2％と広いなど危険な要素が多い。しかしながら日本では統一された取締法規の制定はないので，将来クリーンエネルギーとして水素が大量に使用されるようになつた場合にそなえて，先ず完全な「水素の安全基準の確立」を心がけるべきであると考える。

この安全基準の適用の対象としては，建物，精製装置，液化機，貯蔵タンクなどの諸設備，圧力容器・パイプ，タンカー，トレーラー，計測制御機器緊急時安全回路などが考えられるが，単に安全基準の確立のみを目的としてこれらを検討することは当然ながらむずかしく，

安全供給体系を確立するために密接なフィード・バックの関係を保ちながらハードとソフトが同時に開発されるべき性格のものである。従つて個々の要素とシステム全体とにわたつて検討されなければならないものである。

以上の技術的諸問題を解決するためのソフトとハードの研究・開発のフローを研究開発内容についてまとめると図8－2のようになる。（主として液体水素を例にとつてあるが，他の水素の形態についてもほゞ同様である。）この図からシステム・ソフト・ウエアーの重要性がよく理解されよう。

8－1－3　研究・開発のアプローチの方法

(1)　実用化のための技術的な安全基準の作成

大量の水素を取り扱う安全供給体系を確立するためには将来実用化の前提となる技術的な安全基準を作成する必要がある。この研究項目は他と同様に他の研究項目群と密接な関係をもつているが，一応独立に記述するとアプローチの方法は次の通りである。

まず文献を収集することにより，海外の現行法規および国内の自己規制等の現状を詳細に調査し，次いでこれを検討し，問題点の摘出，その対策の検討を行なう。次いで他の研究開発項目から得られる情報をもとにして安全規準の検討を続け，仮想事故とその波及程度・対策の動的影響などをシミュレートする事故解析を行ない，最終的に技術的な安全基準の案を作成するものである。この安全基準の作成には常圧水素，高圧水素・液体水素，MHの取扱いについて検討される。

(2)　安全供給体系のシステム解析

精製・液化・貯蔵・輸送・分配などの実験室規模での個々の要素についてのデータは散見されるが，これが統合された一つのシステムとして考察され，しかも安全性を基本とした大量取扱いに適用可能な研究は日本では皆無であるといつて差支えない。この研究項目は，全研究項目群の総括をつかさどるソフトウエアであつて特に重要なものである。アプローチの方法は次の通りである。まず考えられるシステム

すなわち，常圧水素・高圧水素・液体水素，ＭＨをふくめた複合システムの代替案を検討し，安全性，信頼性，動特性，合理性を明かにして，これらを評価し各システムを実現する為に解決すべき技術的問題点を摘出し，研究開発計画（以下Ｒ／Ｄ計画という）を立案し検討する。このＲ／Ｄ計画はソフトウエアとハードウエアを含めた概要とハードウエアの詳細な立案に分けられる。これらは他の研究項目にフィード・バックされる。又周辺機器に関しては，国産品・外国製の対比を行いより合理的にＲ／Ｄをすすめるための検討を加える。次いでシステム全体の最適化の検討を行い，各要素・サブシステム等の信頼性解析安全性解析を行つた後，各サブ・システムの統合と最適化の設計を行なう。この時期にハードウエアのスケールアップが行なわれるので，これに伴う技術的な問題点を解析し，最適化設計にフィードバックすると同時に次の研究開発項目にフィードフォワードする。最後に総合評価を行ない，得られた各技術をまとめて整理する。

(3)　安全供給体系用設計基準と実用設計コードの作成

得られた経験，実績をもとにしてシステム解析(1)の結果を加えながら設計基準の原案を作成し，その後他の項目特に前項目のシステム解析からの情報を用いて設計基準の改良，設計コードのプロトタイプの開発，実用設計コードの検討・開発を行ない，ベンチスケール試験によってこれらを実証し，種々の要求にすぐ応じられないような実用設計コードとする。

(4)　精製サイクルの開発

原料水素の純度，圧力，温度を制御するために純度管理という概念を導入し，これらの制御を行ないながらサブシステムを最適化する精製サイクルの開発を行なう。基本設計に続いて適当の規模のベンチスケール(1)の建設，運転を行ない，次いでベンチスケール(II)にスケールアップする。なおこれらの規模は他のプロジェクト即ち水素の製造等の規模などと密接な関係を有する。

(5)　液化，貯蔵サイクルの開発

(5) 液化貯蔵サイクルの開発

安全性を中心としたサブシステムの開発である。液化について特に重要なのは合理的な熱力学サイクルと合理的な大型断熱方式の選択であり，これらを含めて最適化を行なうものである。前項目と同様基本設計に続いて，ベンチスケール(II)と進む。なおこゝでいう最適化とは設定される安全基準を越えない範囲内での費用と効果の最適点を見出すこととしている。なお貯蔵には高圧水素貯蔵，液体水素貯蔵，MH貯蔵が含まれる。

(6) 輸送・分配システムの開発

この項目に関しては我が国では皆無の技術である。たとえば液体水素については，パイプ・ライン，タンカー，トレーラーの内部での2相流，ベーパー・ロック，スロッシング等がありその安全性は予断を許さない。当研究所では現在液体ヘリウムについて検討しているが，非常に難かしいテーマであり，基礎的な研究の少い分野である。ここでは基本設計に続いて同じくベンチスケールI，IIと進む。ここでの最適化はたとえばパイプ径の相違による断熱コストと圧損動力費などで行なわれると想定される。この研究開発項目は，上記の諸現象に由来する動特性，安全性解析の最も重要な部分の1つであつて，この実験結果がシステム解析の有力な情報となるものである。前項と同様に高圧水素，液体水素，MHの輸送，分配が含まれる。

(7) 周辺機器の開発

特に信頼性に重点がおかれ，バルブ，ポンプなどを中心に開発を行なうが，この他に高性能高信頼度でしかも安価な純度計，プラント上での水素リークモニターの開発も計画しなくてはならない。海外技術の導入も考えられる。

(8) 関連基礎研究

計測制御については特に自動化を目標にすべきである。液体水素についていえば流動，伝熱については前記のように2相流，ベーパーロック，スロッシング等の基礎的なしかも非常に重要な現象を解明する

ことが必要である。更に低温材料については現在安価で液体水素に適しているものは少く，その低温材料試験も確立されていない。特に重要なのは工業用低温装置に用いられる材料の組織立つた材料試験法がないことでありこの基礎的な研究を行なう必要がある。

なお，これらに関連して，装置等の大型構造体の強度試験，サーマル，ストレス，地震，時間的劣化，落下物による構造物試験なども重要なテーマである。

(9) 関連パイロット・プラント・スケールの概念設計

他の研究開発項目の成果をもとにして行なわれるもので，パイロットプラントのための概念設計を行なうものである。規模は他のプロジェクトの進行具合によつて決められる。パイロット・プラントによる実証が行なわれるとこれ以降は実用化となる。

(10) 試験法の標準化

前記各研究開発項目を行なつた成果から必然的に標準化に必要なデータが得られる。そこでここでは周辺機器に関する手法，問題が起きた時にこの原因を探求するフィードバック試験手法をまとめ，標準化の作成を行なう。

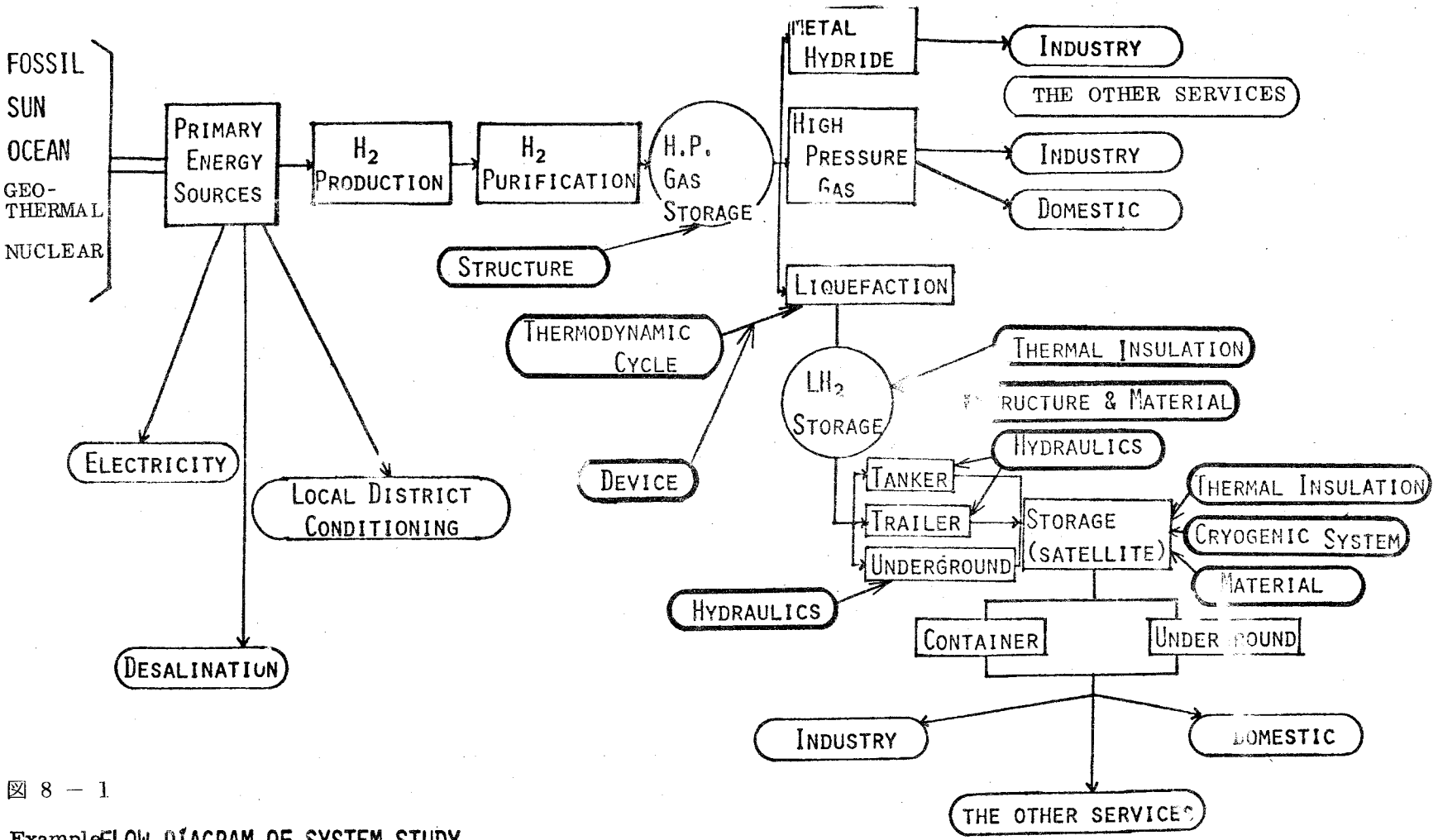


図 8 − 1

Example FLOW DIAGRAM OF SYSTEM STUDY

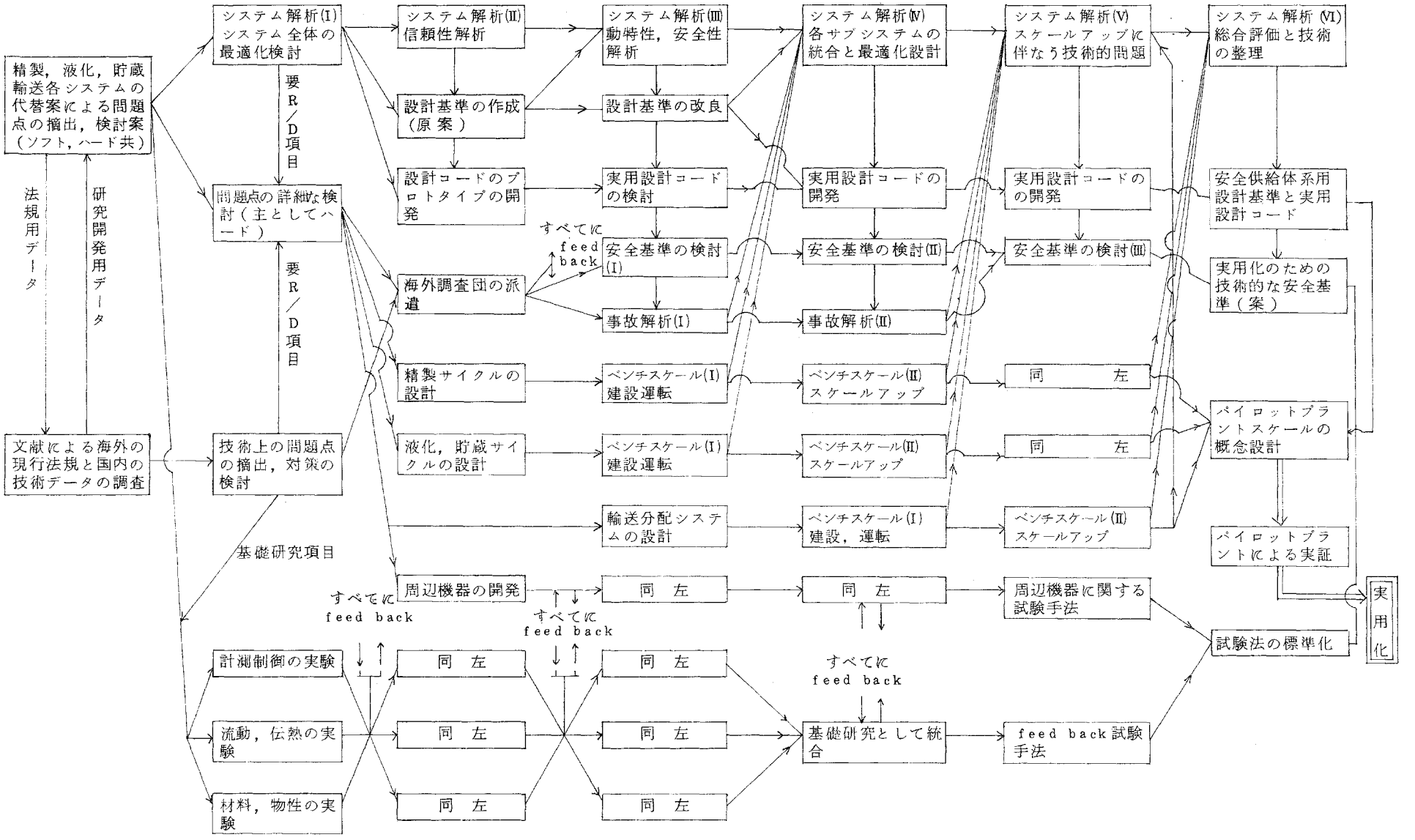


図 8 － 2　研究・開発内容関連図

8－2　水素の精製・貯蔵・分配システムにおける主構成機器の開発

8－2－1　開発の意義

我国のように国土の広さに比べて船舶，自動車，発電機器等のエネルギ機械システムにおける動力発生機関，変換器及びその周辺機器を含み，製造量が膨大で，しかもその消費燃料のほとんどを輸入に頼る，という国は他に例をみないということは周知のことであるが，エネルギ機械に関する発明が皆無で，基本技術や周辺技術を諸外国より導入し，生産台数を上げるという量のみに努力してきたことも不思議な国の一つであろう。

したがつて，熱力学を基本とする動力機械の学問は，基礎的な研究よりも余り手を汚さず短時間で，結論が得られるであろう現象的，あるいは改良技術的な研究のみに時間を費し，その衰退の要因となつた。また大型プロジェクトという名称の開発研究にしても諸外国に，すでにお手本がある場合の追試的な仕事が大部分であつた。このような研究および開発姿勢は，我国の風土や国民性にもよるが，現状技術の確実なる把握とその評価および将来のエネルギ・システムの展望を曖昧にして技術政策や学生の教育が行われてきたことによるものであろう。

水素の精製，貯蔵および分配システム（以下水素システム）は，化石燃料の枯渇や環境汚染による危機感が増大すれば，一次エネルギ源である核融合炉の完成を待たずとも，表現を換えれば，水素が他の燃料より高くとも，徐々に一般社会へと，組み込まれていくことは確かなことであるが，それでも最低１０年はかかるであろう。そこで，エネルギ資源の乏しい我国の技術戦略の１つとして，世界に誇れる水素システムを完成するためには，その主要素である高性能な構成機器（エネルギ機関，変換器等）を独自に開発すべきである。今日から始めても開発時間は充分ある。

主構成機器を開発する意義は，これが全システムの総合効率，価格，保守信頼性，そして採用条件の適否を決定する主要素となるからであり，また共通の主要となり得る応用分野が広く，かつ技術的波及効果

が大きいためである。

高性能とは，簡単に言えば，

イ．高い熱効率

ロ。構成要素の単純さ

ハ。軽量小型

ニ．運転の保守の容易さと高い信頼性及び低コスト

を示すものである。

8－2－2　開発の手順

最初にして最後まで高性能なる機器を開発でき得るか，どうかの決め手は，“開発向きの人”を集め，育てることにある。

なぜならば，高性能なる構成機器の開発研究は，10年単位の地味な基礎研究を着実に行い，初めて独創的なIdeaが生れ，開発成功へのきめ手をつかむといわれているからである。

したがって，単一な目標に対し，まず自分の手を汚し，10年単位の研究に耐え得る人を集めることが先決であろう。これは技術行政にたずさわる人にもいえる。そして研究環境，態勢を論ずることになろう。

また大学に専門課程を設け，研究－教育の充実を計る。

第二の手順として，“どのような機器をどんな性能で何時頃までに開発する”という問題に関する研究である。

特に性能に関する諸元の決定は，将来想定される水素システムの要請から，あるいは現状技術の水準から推定して決まるため，将来の水素システムの性能を決めることにもなる重要な研究である。多くの専門家が集中的に行っても2～3年は充分かかるであろうし，かけるべきである。特にこの問題は，エネルギ機械メーカーにとって最高のKnow-howに属し，また技術行政と密接に関連するため，単純にできるような問題ではないことは当然であるが，開発実績や潜在能力を有するメーカーと共同で構成機器の性能に関する諸元を諸外国から収集し，開発機器と性能諸元の目標値を決めるための資料作成の作業が必要であろう。

作業項目を以下に記す。

イ．構成機器の名称

ロ。メーカー

ハ．動作原理と特長および理論的な適性限界

ニ。性能と型式

容量とスケール・アップ

現状技術の上限

ホ．製造および加工技術

使用材料と適性

ヘ。信頼性および耐久性

運転操作および保守性と価格

ト．価格と市場占有率

チ．国産技術の現状と将来技術において比較検討

リ．性能向上に関する改良技術の有無

ヌ．設計思想および設計式と基準の解明

ル。国産技術による開発目標と見通し

ヲ。開発研究費

ワ。開発時の装置価格と市場性

カ。開発時の競争メーカーの技術水準の想定

8－2－3　機器開発における優先度

優先の順位決定は，次の四つのことから決められるであろう。

イ．水素システムの性能（信頼度，熱効率，保守操作性，装置の重量と容積など）への影響度の大きさ

ロ．システムの価格に占める単価の割合

ハ．システムが極度に単純化されて性能が大きく向上し，しかも低価格が予想される独創的なもの

ニ．広い分野の共通要素となり，量が期待され，しかも転用技術が大きく，開発に長期間を要するもの

上記の四項目を満足させる開発所要機器名を挙げれば

1. 低温および高温の閉サイクル熱機関

2. 回転ピストンとターボ型式の大容量無潤滑圧縮機

3, 低温および高温用膨張ガスタービン

4, 低温および高温用熱交換器と蓄熱器

以上，簡単に述べたが，次年度に水素システムとの関連において，開発機器名と性能・諸元・開発スケジュール，等について詳細な検討を行う予定である。

8－3　金属水素化物関係

8－3－1　要求される金属水素化物の性能

水素ＰＳＴシステムとして具体化する場合に要求される金属水素化物（以下ＭＨ）自体が具備すべき条件は次の通りである。

(a)　水素の吸蔵能が大きいこと（必要体積が小さくてすむこと）

(b)　比較的安定で危険性のないこと。（金属に毒性の少ないこと，自然発火の少ないこと）

(c)　要求される条件，特に比較的低温で充分な水素吸収速度および放出速度を有すること。

(d)　水素の吸収および放出のサイクルを繰り返しても性能が変らないこと。

(e)　水素ガス中の不純物の影響を受けにくく，もし受けた場合でもその再生が容易であること。

(f)　水素化物の密度がなるべく小さいこと（軽いこと）

(g)　安価で，しかも資源的に豊富であること。

(h)　水素化物の生成熱があまり大きくないこと。

(i)　金属および金属水素化物の熱容量が小さいこと。

なお，作業条件としては，温度50～80℃，圧力1～20気圧がみたされない限り汎用とはならない。

8－3－2　金属水素化物自体に関する研究開発の方行

新しいＭＨを開発するためにはまずその特性を調査する必要がある。比較検討する特性項目は次の通りである。

(a)　化学的性質

i）水素保持量　kg/kg

ii）金属の所要純度

iii）水素の所要純度

(b)　物理的性質

i）金属密度

ii）熱容量

iii）熱伝導率

iV）金属粒径

(c)　熱力学的，速度論的データ

i）平衡データ，水素分圧対温度対保持量

ii）吸収，放出の速度論的データ

iii）分解熱（ΔH）

(d) その他

i) 活性化の方法

ii) 金属調整法

iii) 安全性

iv) その他

これらの特性項目を検討しつつ

・金属固体表面における水素の反応機構の解明

・固体内への水素の拡散機構の解明

・吸収，放出の反応速度定数の決定

・水素脆化への対応策の確立

を行なうべきであろう。

8－3－3 エンジニアリングの問題

水素の吸収，放出（又はMHの生成，分解）は反応律速よりもむしろ熱移動律速であると考えられる。従つて高性能な熱交換器が必要となる。

次いで，水素脆化による粉化，固着化のためにプラギングの起こる可能性もあるので，装置の実用化にあたつては，この点を解決する手段の開発が必要となる。

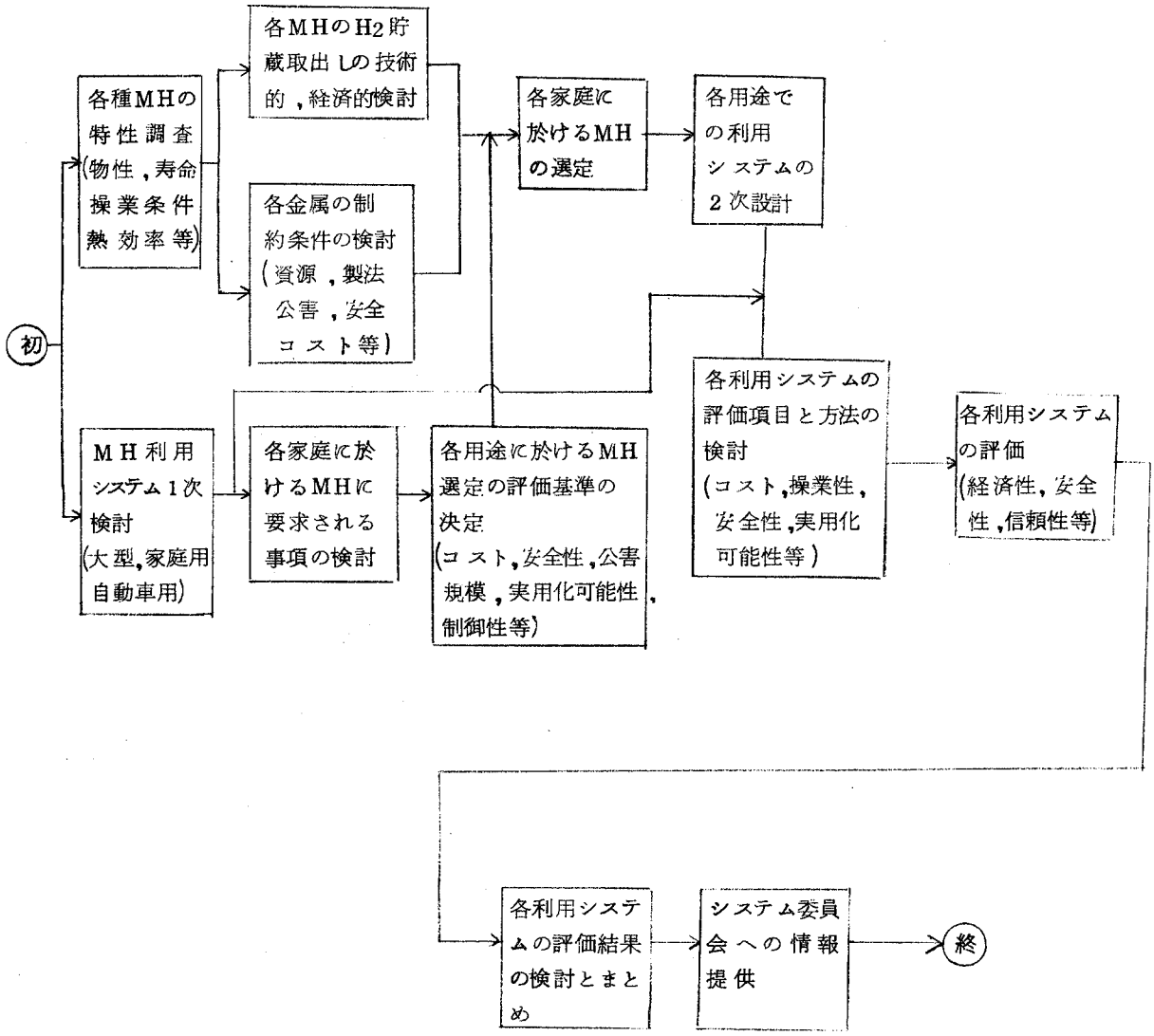
又，輸送の場合の振動対策などもエンジニアリングの問題となる。

なお，環境安全性上特に注意を要することは，金属の環境への放出が行なわれないよう十分な除粉措置を講ずることであろう。

8－3－4 金属水素化物選定のための手順

MHの選定基準は画一的ではなく，用途によつてそれぞれ定める必がある。たとえ

たとえば，固定大型貯蔵庫の場合は，低反応温度，小熱容量，低コストが要求されるが，自動車用の場合は第一に軽量が要求されるなどである。このような用途別の代替案をふくめて，どのようなMHを開発し選したらよいかの手順のフローを次に示す。


初
各種MHの特性調査(物性，寿命操業条件熱効率等)
各MHのH2貯蔵取出しの技術的，経済的検討
各金属の制約条件の検討(資源，製法公害，安全コスト等)
各家庭に於けるMHの選定
各用途での利用システムの2次設計
MH利用システム1次検討(大型,家庭用自動車用)
各家庭に於けるMHに要求される事項の検討
各用途に於けるMH選定の評価基準の決定(コスト,安全性,公害規模，実用化可能性制御性等)
各利用システムの評価項目と方法の検討(コスト,操業性，安全性,実用化可能性等)
各利用システムの評価(経済性，安全性,信頼性等)
各利用システムの評価結果の検討とまとめ
システム委員会への情報提供
終

8－4　材料・構造・熱流体等の基礎

8－4－1　材料強度

a．水素雰囲気脆化

- 従来の関連研究データを収集，分析，評価する。
- 実用の可能性のある諸材料について純粋な条件と実用的条件において脆化の発生，進行状況を調べる。
- H_2 の純度，温度，圧力などパラメータとして実験する。
- 脆化を生じないような設計範囲を固める。
- とくに温度，圧力，応力等の動的な変化に対する特性も調べる。

b．耐衝撃強さ

- 気体水素利用系と液体水素利用系の主要構造材料に対して，想定しうる衝撃力に対する耐性を調査，研究する。
- 熱衝撃に対する強さ，緩和特性など。

c．低温強度

- とくに複合材料，新材料などについてデータをとる。

d．高温クリープ

- 改質等に必要な高温プロセスにおいて，耐熱合金の開発が必要であり，高温においてはとくにクリープ強度，クリープ量，クリープ速度などのデータが重要となる。

e．加工性

- とくに新材料の溶接性，曲げ性など。

f．水素透過性

- 基礎データとして材料の表面における水素移動抵抗，内部での拡散特性などのデータを収集する。

g．熱・強度パフォーマンス

- 熱設計とカプリングした最適材料の選定のためのデータの整備。

8－4－2　構造強度

a．応力評価法の確立

- 主要機器の応力評価のための解析コード作成，応力基準制限値との対照法の検討など
- 応力均一化，応力逃げなどのための最適設計パラメータ選定手法の開発

b．耐　震

- 耐震設計コードの作成
- LH_2タンクの地震カ－流体カプリング問題の解析
- LH_2パイプラインの問題
- 高温機器の耐震問題

c．熱との関連問題

- 熱応力の対策
- 熱膨張の対策
- 熱衝撃の緩和
- 熱経済的な構造設計の基礎

d．溶　接

- 溶接技術の進展
- 溶接部強度，とくに水素雰囲気脆性をはじめとする各種問題

8－4－3　熱流体

a．高圧水素ガスフロ－圧力損失評価

- 簡便式の開発，とくにバルブ等の損失

b．低温水素2相流

- 圧力損失評価
- 流動不安定
- 駆動機械の熱流力設計

c．LH_2貯蔵

- タンク内の熱的成層化
- ボイルオフの評価
- 移送時の流量制御

d．異常時の問題

- 急速遮断時の圧力波生成とその抑制
- 配管破断時の水素拡散
- 微小孔からのリーク特性
- LH_2タンク・パイプライン等の断熱破壊時の現象と対策
- コモン電力ケーブルにおける超電導破壊時の発熱処理
- LH_2と高温物質との瞬時接触に伴う熱的相互作用

e．金属水素化物

- 反応容器内での対流伝熱
- 微粒化の熱伝導問題

f．材料の熱特性

- 熱伝導率
- 輻射率
- 比　熱
- 熱膨張係数

g．主要機器の熱移行

- 熱交換機器における熱伝達の促進
- 断熱系におけるより優秀で安価な断熱技術

おわりに

以上に記した内容は，主として水素流通大系のシステム解析にあるが，これを簡単にまとめると次のようになる。すなわち，

(1) 前　提

水素エネルギーシステムの精製，貯蔵・輸送システムを検討するためには，いくつかの前提条件をおく必要があるので，まず将来をいくつかの時点に区切り，かなり理想的に最も大量の水素でエネルギーが代替されるものと想定し，それによって水素の需要の規模を設定した。2次エネルギー形態は水素と電気のみを対象としたが，これは単純化のためであって，たとえば地域的な温・冷水供給による暖・冷房など熱の直接利用を排除するものではない。水素と電気以外のものを考慮しても本報告書の前提とする水素需要規模が若干変わるだけであって問題の本質には影響が少いと考えられる。

次に，水素消費の時空的パターン・規模を設定するために，ある程度の独立性をもった都市を想定することにし，いくつかの性格をもった都市を人口をパラメータとし，更に実存の都市における各形態のエネルギー消費の傾向や規模を参考として，想定都市のそれぞれの水素，電気消費量を設定した。これにより，必要とする各種設備の大体の規模や特性の輪郭が浮び上がることになる。

1次エネルギーを変換するには将来は原子力基地が中心になる可能性が強く，これは都市から遠くはなれた地点に立地するものと思われるので，遠隔基地からのエネルギー輸送をまず想定した。また都市の入口でも2次エネルギーを受けとり，変換し，あるいは部分的に1次エネルギーの変換をも扱う中間基地を想定した。都市を単独で考える場合やいくつかの都市群でエネルギーをやりとりする場合なども考え，エネルギー基地のパターンを考えてみた。さらに都市内部でのエネルギーの貯蔵・輸送・分配のシステムを考え，末端への分配センターを想定した。末端利用の形も考えうるものを列挙した。地上交通機関など将来はシステム式にもハードウェア的にも相当に新しい構想が採用されるものと思われるが，本研究ではそこまで立ち入らず，一応現状に近い交通システムを想定し，燃料だけが水素におきかわれるものという前提にとどめた。

以上により，水素利用のシステムとして実用化の可能性のあると思われる経路

をできるだけ洗い出し，ネットワークの上で要素をブロック的に表わしてみた。これによって，水素利用システムで必要となりうる材料，機器，システム技術などのおおよその仕様が判明することになる。

(2) 現状技術と将来

本研究の主眼が精製・輸送・貯蔵なので，まず，それぞれについてシステム要素およびシステム制御の上から問題となる技術について，現状と将来の見通しを調査検討した。具体的には技術の土台となる原理，ハードウェアの性能，信頼性，制御性，安全性，そして設計基準や設計式などを中心に，さらに現状技術のフロントについても広く調査検討し　。水素利用からの規模や特性に対する要請に対し，現状はどの程度であるのか，そのギャップを明らかにし，技術的にみた向上の射程限界内にあるのかどうか，また技術的解決策として最もスマートな方法は何かについても第一次近似的な意味で検討した。

まとめ方としては，精製・貯蔵・輸送のそれぞれについて水素ガス，液体水素，金属水素化物の諸形態に対応させている。

(3) システムの代替案

精製・貯蔵・輸送システムについては，あらゆる可能な経路からより単純で合理的な経路を選び出し，いくつかの参考モデルシステムの構成を試みた。まず，代替案の分れ目となるいくつかの基本的トレードオフ項目を選び，それについて上記の各要素の技術的特性を考慮しつつ，さらに経済性その他をも考慮しつつ優劣を検討し,今後の評価作業への足掛りを作成した。この際，水素・電気のエネルギー変換，水素の各形態の相互変換，液体水素のボイルオフ等々も考慮した。

代替案は基本的な骨組みにとどめたが，いくつかの要素については専門家の眼を通して，ある程度詳細な検討を進めてみた。例えば民生・産業用のガス供給ライン，液体水素スタンドによる自動車への燃料分配，液体水素使用の空港構想などがそれである。

(4) 問題点の摘出

次年度にはこれらの代替案について，さらにエネルギー効率，信頼性，安全性，コスト，取扱便利性（社会的適合性の一要件）などの面で入力データをふやした上で，漸次定量的な比較評価を行なう計画であり，そのための予備的作業として

評価ネットワークの骨組みについて検討を行なった。その結果，必要とされる調査項目，内容，問題点等が明らかにされた。

研究課題としては，システム，機器，材料等の各レベルについて重点項目と目標についてまとめてみた。とくにスケールアップについては，相当に具体的な提案（たとえば7－6－2，7－7－1，§8など）を行なった。

これらの研究は将来，水素の安全供給体系のための実用安全設計コードの開発にむすびつけられることを当研究所は希望している。

水素利用については，小規模なものについてさえ我国ではまだ経験が一般に浅いため．ましてや社会全体が水素を重要エネルギー媒体として受け入れることを想定した場合の各種の入力データとして信頼性のおけるもの，数量的なものは現在我国独自のものについては，まずほとんど得られないといっても過言ではない。従って，本研究で若干の外国文献調査を除いては相当困難を極めたが，しかし，比較的短期間内に，目安的なものも含めて所期の目的を上まわる成果が得られたと自負している。しかしながら，本システムの実用化をはかるためには次期以降においてこれらの入力データを再検討し，増補していくことが不可欠であり，更に我国で経験的にデータを蓄積していくことが最も大切であると確信している。

本研究のために参照利用した文献は数多い。

ここには本文中でとくに引用したり、参照を求めたもののみをかかげる。

1. Cryoginic Fundamentals, edited by G.G.Haselden

2. Conference Proceedings: Energy Conversion Engineering Conference, 1971-1973

3. 〃 IIASA Planning Conference on Energy Systems, 1973

4. 〃 The Hydrogen Economy Miami Energy Conference, 1974

5. Advances in Cryogenic Engineering, Vol.17

6. SCIENCE, Vol.174, No.4007, 1971, Vol.180, No.4093, 1973

7. Prospects for Liquid Hydrogen Fueled Commercial Aircraft, William J.D.Escher Report PR-37, Escher Technology Associates, 1973

8. Hydrogen Energy 1973

9. 水素エネルギーシステムの開発 太田時夫 1974

10. エネルギー媒体としての水素 NASA—ASEE 1973

11. 新エネルギー技術研究開発計画（サンシャイン計画）
（財）日本産業技術振興協会 1974

12. 日本開発銀行調査月報 1972 7月号

13. ENERGY 1974 1～5月号

14. 低温工学 1969 Vol 4 №6

15. 日本物理学会誌 Vol. 29, №7 (1974)

16. 化学経済 12月号 1974

17. 水素エネルギーシステム研究発表会予稿集 1974

18. 水素燃料技術に関する研究 日本ガス協会

19. 日本国勢図会 国勢社 1974

20. エネルギー統計 資源エネルギー庁 1974

21. 世界の資源と日本経済 世界経済研究協会編 1974

22. 日本の統計 総理府統計局編 1974

23. 世界の天然ガス資源 科技庁資源調査所編 1972

24. 国際統計要覧 総理府統計局編 1974

25. 将来の資源問題	科技庁資源調査所編	1972
26. 日本の資源図説	〃	1971
27. 石油学会誌	石油学会	1975
28. 原子力資料	日本原子力産業会議	1974
29. 石油統計年報	通産大臣官房調査統計部	1972
30. 石炭・コークス統計年報	〃	1972
31. 原子力ポケットブック	日本原子力産業会議	1974
32. 産業ハンドブック	第一勧銀産業調査部	1973
33. 石油資料	通産省鉱山石炭局	1973
34. 原子力年鑑	日本原子力産業会議	1974
35. 日本統計年鑑	総理府統計局	1974
36. 電気事業便覧	電気事業連合会	1973
37. 国際・石油情勢とエネルギー問題	日本エネルギー経済研究所　向坂	1972
38. 日本　1980	住友ビジネスコンサルティング　CDI 共編	(1973)
39. 液化天然ガス技術総覧	ソフトサイエンス社	1973
40. 燃料便覧	燃料協会編	1974
41. 安全工学便覧	安全工学協会編	1973

JN0040197