

N91-06-07.1

MASTER

水素利用国際クリーンエネルギーシステム
技術 (WE-NET) 第 I 期 研究 開発 発
中 間 成 果 報 告 書

平成 9 年 1 月

DISTRIBUTION OF THIS DOCUMENT IS UNLIMITED
FOREIGN SALES PROHIBITED

新エネルギー・産業技術総合開発機構
水素・アルコール・バイオマス技術開発室

DISCLAIMER

Portions of this document may be illegible electronic image products. Images are produced from the best available original document.

は　じ　め　に

本報告書は、平成8年度に予定されている「水素利用国際クリーンエネルギーシステム技術（W E - N E T）研究開発」の工業技術院による中間評価に際して、新エネルギー・産業技術総合開発機構（N E D O）が、これまでの研究開発成果についてまとめたものである。

本研究開発（W E - N E T）は、通商産業省工業技術院のニューサンシャイン計画の一環として、N E D Oが通商産業省の補助を受け、平成5年度より取り組んでいるものである。これは、世界的に偏在する再生可能エネルギーを利用して、水から水素を製造し、これを輸送可能な媒体に変換して輸送し、世界のエネルギー多消費地域に供給することにより、世界的な規模でエネルギーの有効利用を図ろうとするものである。

全体構想としては2020年度（平成32年度）までの28年間で3期に区分し研究開発を行うものであるが、第Ⅰ期研究開発基本計画では、技術ばかりでなく、ソフト面からも世界的な規模で導入を可能としうる技術の確立を目指している。

本技術が確立し、世界的に普及されることとなれば、二酸化炭素などの地球環境影響物質の排出が低減されるとともに、国際的なエネルギー需給が緩和され、さらに再生可能エネルギー保有国に新たなエネルギー生産、輸出産業の育成を促すことも期待できることとなる。

今後、工業技術院による中間評価の結果を踏まえ、本研究開発の適切な遂行に努めて参りたい。

平成9年1月

新エネルギー・産業技術総合開発機構

水素・アルコール・バイオマス 技術開発室長

新　井　晴　美

水素利用国際クリーンエネルギーシステム技術(WE-NET)開発委員会

〈委員長〉

笛木 和雄 東京大学名誉教授 東京理科大学理工学部教授

〈委員〉

伊原 征治郎 日本工業大学システム工学科教授

上田 雅美 財団法人中央電力協議会技術開発部長

甲田 壽男 通商産業省工業技術院機械技術研究所
エネルギー部長

小林 博行 日本エタノール株式会社取締役企画調査部長

竹中 啓恭 通商産業省工業技術院大阪工業技術研究所
エネルギー・環境材料部長

竹矢 一雄 前徳島大学教授

福田 健三 財団法人エネルギー総合工学研究所WE-NETセンター
プロジェクトマネージャー 副主席研究員

(平成9年1月現在の委員(五十音順))

〈開催実績〉

平成5年度
第1回開発委員会 平成6年 3月14日(月)

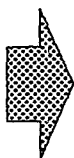
平成6年度
第1回開発委員会 平成6年 7月22日(金)
第2回開発委員会 平成7年 3月22日(水)

平成7年度
第1回開発委員会 平成7年11月10日(金)
第2回開発委員会 平成8年 3月21日(木)

平成8年度
第1回開発委員会 平成8年12月13日(金)

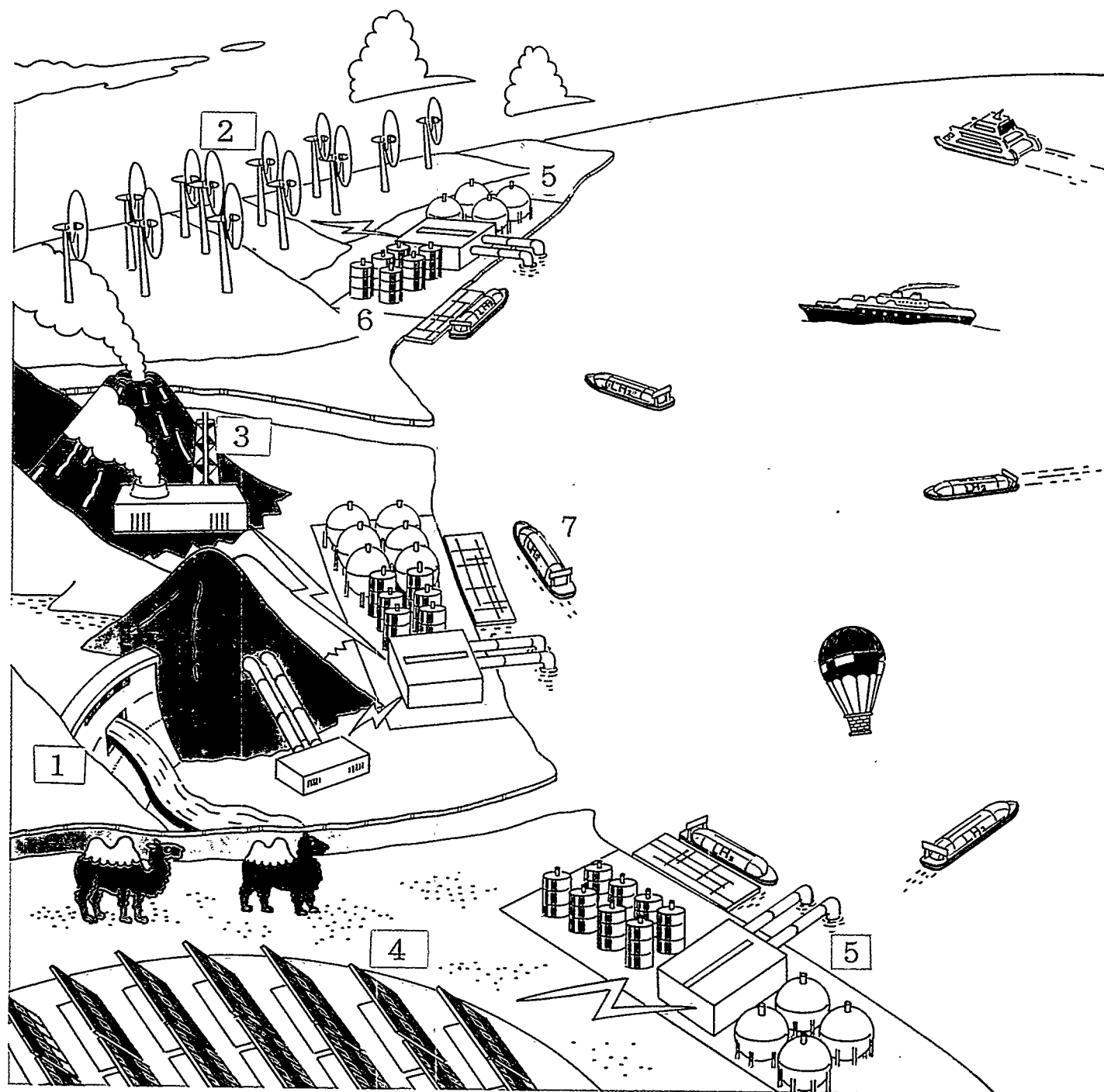
A detailed black and white line drawing of a futuristic cityscape. The scene is viewed from an elevated perspective. In the upper left, a sleek, high-speed train or rocket (labeled 12) streaks across the sky, leaving a long, dashed trail. A bright sun with radiating lines is positioned in the upper center. To the left of the sun, a whale (labeled 1) is depicted breaching the water's surface. Below the whale, a satellite dish (labeled 2) is shown in orbit. In the lower left, a group of fish (labeled 3) swims near the water's edge. The city itself is a complex of various structures. A large, multi-story building with a central tower (labeled 4) is prominent. To its right, a series of tall, cylindrical towers (labeled 5) are visible. A winding road or railway track (labeled 6) cuts through the city. In the foreground, a large, multi-story building (labeled 7) is situated. To its right, a series of cylindrical structures (labeled 8) are visible. A large, multi-story building (labeled 9) is located in the center. To its right, a series of cylindrical structures (labeled 10) are visible. A large, multi-story building (labeled 11) is situated in the upper right. A large, multi-story building (labeled 12) is located in the lower right. The city is surrounded by a body of water, and a small boat (labeled 13) is visible in the lower left. The overall style is a clean, minimalist line drawing.

⑥水素貯蔵タンク
⑦水素輸送タンカー



⑧水素燃焼発電所
⑨水素自動車
⑩水素バス
⑪水素ロケット
⑫水素飛行機

水素利用国際クリーンエネルギーシス



再生可能エネルギー 利用発電

- ①水力発電所
- ②風力発電所
- ③地熱発電所
- ④太陽光発電所

水素製造

⑤水素製造プラント

目 次

第1章 水素利用国際クリーンエネルギーシステム技術の研究開発の必要性	1
1. 1 再生可能エネルギーの導入の必要性	1
1. 2 水素による二次エネルギー体系の確立	2
1. 3 本研究開発の必要性	4
第2章 第1期研究開発の概要	7
2. 1 研究開発基本計画	8
2. 2 研究開発体制及び実施方法	16
第3章 研究開発の実施状況及び成果	22
3. 1 全体システム	22
3. 1. 1 概念設計	22
3. 1. 2 グローバルネットワーク研究	37
3. 1. 3 一国規模での予測評価	55
3. 1. 4 都市規模での予測評価	65
3. 1. 5 安全対策	73
3. 2 国際協力推進のための調査・検討	76
3. 3 水素製造技術	85
3. 4 水素輸送・貯蔵技術	100
3. 4. 1 大量輸送・貯蔵技術	100
3. 4. 2 分散貯蔵・輸送技術	122
3. 5 水素利用技術	127
3. 5. 1 水素燃焼タービンの開発	127
3. 5. 2 その他の利用技術	166
3. 6 革新的・先導的技術	185
(参考) W E - N E T に係る特許出願状況	189

第1章 水素利用国際クリーンエネルギーシステム技術の研究開発の必要性

1. 1 再生可能エネルギーの導入の必要性

現代社会は、エネルギー資源の大量消費により支えられており、将来の人口増加、発展途上国の経済発展等を考えた場合、今後とも、現在の生活レベルを維持していくためには、さらに大量のエネルギー資源が必要となると考えられる。エネルギー資源には、石油、石炭、天然ガスなどのいわゆる化石エネルギーのほか、水力、太陽光、太陽熱、風力、地熱などの自然エネルギー、さらには原子力・核融合といったエネルギーがあるが、現在においては、経済性等の観点から化石エネルギーがエネルギー供給の大半を占めている。

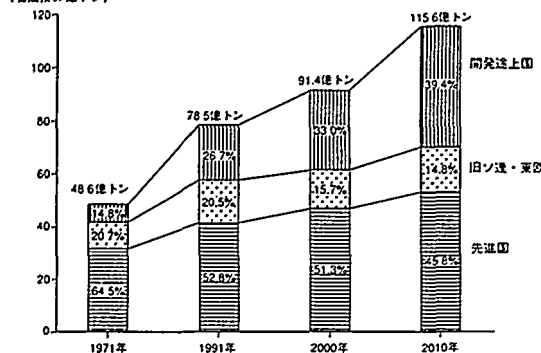
しかしながら、化石エネルギーについては、将来における枯渇が危惧されており、世界的なエネルギー消費の飛躍的な増大を考えた場合、将来的には価格上昇が予想され、原油価格等の高騰による深刻なエネルギー危機が発生する可能性も否定できない。また、化石エネルギーは、その消費に伴い硫黄酸化物、窒素酸化物、二酸化炭素といった環境影響物質を排出するため、酸性雨問題、地球温暖化問題をはじめとする地球環境問題の原因となっている。

他方、水力、太陽光などの自然エネルギーは、自然環境の中で無限に繰り返し利用できることから、再生可能エネルギーとも呼ばれており、環境影響物質を排出しないクリーンなエネルギーであることから、エネルギー・環境問題の解決に大きく貢献するものである。

このような観点から、化石エネルギー依存の形態を転換し、地球環境に優しく、クリーンな再生可能エネルギーの導入を図っていくことが必要である。

世界の一次エネルギー消費量の地域別推移および見通し

(石油換算億トン)



〈出典〉 IEA "WORLD ENERGY OUTLOOK TO THE YEAR 2010"

主要国のエネルギー源(1994年値)

	石油	天然ガス	石炭	水力	原子力	一次エネルギー消費量(1994年値)
世界計	40.0	23.0	27.2	7.2	2.5	79.3
アメリカ	39.8	26.3	24.3	8.6	1.1	20.3
ロシア	24.5	50.4	19.0	3.8	2.3	6.6
中国	19.2	76.4	2.0	0.4	1.9	7.5
日本	56.1	11.3	17.1	14.1	1.3	4.8
ドイツ	40.5	18.3	28.9	11.7	0.5	3.3
カナダ	35.7	28.5	11.2	12.5	12.0	2.2
イギリス	38.2	28.0	23.0	10.5	0.3	2.2
フランス	39.0	11.9	6.1	40.0	3.0	2.3
イタリア	61.5	27.2	8.5	2.7	1.5	

注) 四捨五入により合計は100に合わない場合がある。単位：%
〈出典〉 BP統計より

1. 2 水素による二次エネルギー体系の確立

水力、太陽光、太陽熱、風力、地熱といった再生可能エネルギーは、地球上に広くかつ豊富に賦存すると考えられるが、自然的・地理的条件に制約され、また、総じてエネルギー密度が低く、分散型エネルギーが中心にならざるを得ないのが現状である。これらのエネルギーの世界的な利用を考えた場合、短距離であれば例えば水力発電によって電力に変換して送電線により輸送することが可能であるが、大陸間のような長距離については経済的・技術的に送電することは現状では困難であると考えられる。

したがって、再生可能エネルギーを地球規模で効率的に利用するためには、世界各地の様々な種類・形態の再生可能エネルギーを二次エネルギーに変換して、消費地に輸送する方法が必要であり、その生産から輸送・貯蔵・消費段階まで一貫して取り扱える二次エネルギー体系の確立が不可欠となっている。

このような再生可能エネルギーの二次エネルギー媒体として、水素が大きく期待されている。その理由は以下のとおりである。

①現代社会は、電力と流体燃料という二種類の二次エネルギーを柱とするエネルギーシステムを基盤としている。再生可能エネルギーは、もっぱら電力又は熱エネルギーの形態で採取されるが、これらを水素に変換することにより、貯蔵しにくい電力を貯蔵可能な形態に変えることができるとともに、水素自体を流体燃料として利用することができる。これにより、従来の二次エネルギーシステムとの相互融通性を維持した形として、現行のエネルギーシステムのインフラストラクチャーを抜本的に変更することなく、再生可能エネルギーを導入できる。

②水素を燃焼させても水を生成するのみであり、硫黄酸化物、窒素酸化物、二酸化炭素といった環境影響物質を生成しない点から、既にそのもの自体が環境に優しいクリーンエネルギーとしての条件を満たしている。現在、水素はその殆どが化石燃料から作られているが、これを再生可能エネルギーにより製造し、二次エネルギーとして利用すれば、二重の意味での「クリーン性」を兼ね備えることになる。

③水素の化学的性質は、上記の「クリーン性」以外にも、(a)水を原料として世界各地で製造できること、(b)化学反応によってメタノールやアンモニアといった他の化学媒体に変換できること、(c)燃焼温度が高く高効率の新しい燃焼技術の燃料として利用され得ること、等の多くの有用な性質を有している。水素は既に化学工業原料として広く利用されているが、今後は、水素自動車、水素タービン等など新たな熱機関の燃料としての有効性が期待されている。

このような利点を有する水素を二次エネルギーの輸送・貯蔵媒体として利用することができれば、再生可能エネルギーの国際市場による取引が可能となり、国際エネルギー需給の多様化・安定化に資するものとして期待できる。他方、再生可能エネルギーが多く賦存する国々にとって、水素の輸出は新たな外貨獲得の手段となる。とりわけ発展途上国にとっては水素製造・貯蔵基地等のインフラストラクチャーの整備等による経済開発も期待され得るものと考えられる。

このため、発展途上国等に未利用の形で豊富に存在する水力、太陽光、風力等の再生可能エネルギーを水素等の輸送・貯蔵可能な形態に転換し、世界の需要地に輸送し、発電、輸送用燃料、都市ガス等の広範な分野で利用する水素エネルギーのネットワークを構築していくことが必要である。

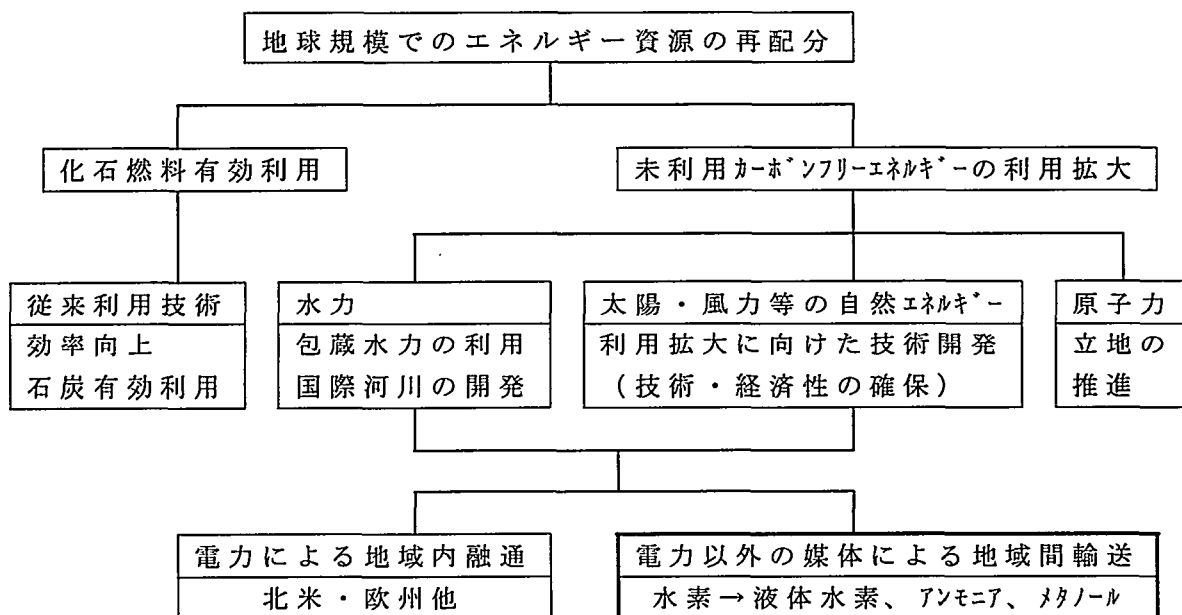


図 1. 1 クリーンエネルギーネットワークシステムの構想図

1. 3 本研究開発の必要性

水素を二次エネルギー媒体とした再生利用エネルギーの国際的な利用を実現していくために企画・立案されたのが、水素利用国際クリーンエネルギーシステム技術(W E - N E T ; World Energy Network)研究開発である。本プロジェクトでは、世界各地に存在する再生可能エネルギーを利用して、電気分解により水から水素を製造し、これを輸送可能な媒体に変換してエネルギー消費地域に輸送し、消費する世界的規模のネットワークの導入を可能とすることを目的として、中核的な要素技術の開発及びシステム設計等を総合的に推進することとしている。W E - N E T の全体システムの基本的な構成を下図、その要素技術について下記に記載する。

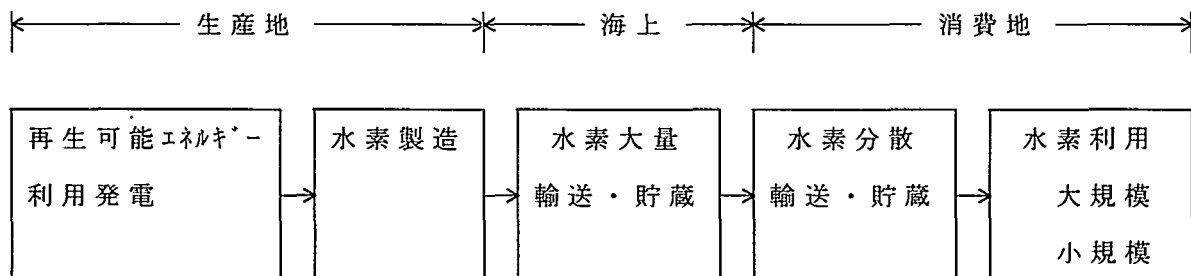


図 1. 2 全体システムの基本構成

(1) 水素製造技術

水を原料とした水素製造技術には、水電解法、高温水蒸気分解、熱化学法、太陽光利用法等各種製造方法が考えられるが、大規模な水素製造技術としては、現時点では技術的・経済的観点から水電解法が有力である。

水電解法には、アルカリ水電解法と固体高分子電解質水電解法があるが、本プロジェクトにおいては、固体高分子電解質水電解法を選択して開発することとした。すなわち、アルカリ水電解法は、構造が簡単で工業化され各種プラントが稼働しているが、エネルギー変換効率が低く、装置が大型化してしまう。他方、固体高分子電解質水電解法は、商業化には至っていないが、エネルギー変換効率及び電流密度が高く、原理的に飛躍的な性能向上・経済性向上の可能性があり、本プロジェクトのように大量の水素製造を伴う水素製造技術として、固体高分子電解質水電解法の開発が不可欠であると判断し、その研究開発を進

めている。

(2) 水素大量輸送・貯蔵技術

製造された大量の水素を輸送・貯蔵する手段としては、水素ガスを液化して液体水素として輸送・貯蔵する方法、水素をメタノール、アンモニア等の化学媒体に転換して輸送・貯蔵する方法がある。化学媒体については、水素からのメタノール、アンモニア合成は工業規模で実用化されており、水素への分解についても実用化はされていないが、類似プロセスが応用可能であり、技術的課題は少ないと考えられる。一方、液体水素は密度が水素ガスの約800倍であることから、液体水素を用いることにより、高効率輸送・貯蔵技術が期待されるが、国内外での利用は宇宙ロケットエンジン用の燃料等に限られているため、大量液体水素の輸送・貯蔵技術は開発に殆ど着手されていないのが現状である。将来を考えた場合、液体水素を用いた高効率輸送・貯蔵技術の確立が有利と考えられ、水素液化設備、輸送設備、貯蔵設備、液体水素ポンプ他各種機器、低温材料等関連技術の開発を進め、効率的かつ経済的なシステムを選択・確立していく必要がある。

なお、輸送・貯蔵方式として、技術的問題点の比較的少ないメタノール、アンモニア等の化学媒体を用いたケースについても、全体システムの概念設計を行い、液体水素利用ケースとの相互比較・評価を実施することとする。

(3) 水素利用技術

水素の利用形態としては、まず、エネルギー源を化石燃料で賄っている分野への代替が考えられ、発電等の集中的な大規模利用及び民生、輸送等への分散型の小規模利用が想定される。

① 大規模利用

水素の大規模な集中利用形態としては、発電への利用が考えられる。水素は酸化剤として酸素を用いると約3,100Kという高温となり、高温ガスタービンへの適用が可能である。また、燃焼生成物は、全て水蒸気であり極めてクリーンであることに加え、高温下の水素燃焼タービンによる発電によって、発電端効率60%以上という極めて高効率な発電システムが成立する可能性がある。

本プロジェクトでは、水素燃焼タービンの開発を目指し、最適なサイクル

の選定を行い、タービン入口温度1,700℃級の水素燃焼タービンの開発を行う。現状のLNGガスタービンは、未だ1,500℃に達しておらず、1,700℃は、燃焼器、タービン翼、ロータ等に更に進んだ冷却方式、構造を必要とする。また、水素酸素燃焼については、工業技術院のサンシャイン計画で既に基礎研究がなされてはいたが、高温水蒸気雰囲気中での燃焼については、これまで国内外とも知見がなく、水素燃焼特性の把握から開発を進めていく。

②小規模利用

小規模利用としては、民生、輸送等の様々な分野での分散型の利用形態が想定され得る。水素を既存の化石燃料と置き換えることにより二酸化炭素の排出削減が進む分野が存在すると考えられる。具体的には、コージェネレーション、輸送機関、燃料電池、冷熱利用等があり得る。これらの利用技術については、将来の水素エネルギー導入を容易にしていくためにも、現状把握、問題点抽出、利用可能性等を検討することとする。

また、小規模利用への供給システムについても、利用システム自体の検討と併行して検討する。

(4)革新的・先導的技術

上記の技術以外であっても将来的に有望なものについては、本プロジェクトに反映させていくことが重要である。このため、革新的・先導的技術に関する調査・検討・評価を行い、必要に応じて基礎研究を実施する。

第 2 章 第 1 期研究開発の概要

本プロジェクトは、通商産業省工業技術院のニューサンシャイン計画の一環である「水素利用国際クリーンエネルギーシステム技術（W E - N E T）」研究開発として、新エネルギー・産業技術総合開発機構（以下、当機構と略す。）が平成 5 年度より実施してきたものである。

本研究開発の全体構想は、1993～2020年までの28年間をⅠ～Ⅲ期に区分して研究開発を行うものであるが、第Ⅰ期基本計画では、国際エネルギーネットワークの導入を可能とする技術の確立を目指して、トータルシステムの概念設計を行うとともに、中核的要素技術を開発することを目的としている。

以下に第Ⅰ期研究開発基本計画を掲げるとともに、具体的な研究開発体制及び実施方法を示す。なお、本プロジェクトの当初の基本計画は、平成 5 年に策定されたが、平成 8 年 3 月に、研究開発の進捗状況等を踏まえて、産業技術審議会エネルギー・環境技術部会での審議を経て基本計画の改訂が行われた。

基本計画の主要な改訂点は、次のとおりである。

① 研究開発期間等の変更

当初の基本計画では、基本構想の研究開発期間（第Ⅰ～第Ⅲ期）を平成 5 年度から 28 年間、第Ⅰ期研究開発期間を 4 年間としていたが、基本計画は第Ⅰ期について定めることとし、第Ⅰ期を 6 年間とした（第Ⅰ期を 2 年間延長）。

② 研究開発目標の設定

水素製造技術、発電用水素－酸素燃焼タービン、水素吸蔵合金について研究開発目標をより具体的に設定した。

③ 利用技術の研究開発項目の見直し

水素の大規模利用技術（発電用タービン）に加えて、その他の有望な利用技術についても要素技術開発等を行うこととした。

2. 1 研究開発基本計画

水素利用国際クリーンエネルギーシステム技術（W E - N E T）

第 I 期研究開発基本計画

平成 5 年 3 月 2 2 日 策 定

平成 8 年 3 月 2 2 日 改 訂

工業技術院

1. 研究開発期間 : 平成 5 年度～平成 1 0 年度（6 年間）

2. 研究開発費総額 : 約 1 0 0 億円

3. 研究開発の目的

地球上に豊富に存在する水力、太陽光、風力等のクリーンな再生可能エネルギーの大規模・有効な利用により、地球環境問題の解決に寄与するとともに、エネルギー需給を緩和するため、これらエネルギーから水素を製造し、必要に応じ転換し、輸送・貯蔵し、発電、輸送用燃料、都市ガス等の広範な分野で利用する国際エネルギーネットワークの導入を可能とする技術の確立を目指し、トータルシステムの概念設計を行うとともに、中核的要素技術を開発することを目的とする。

4. 研究開発内容及び目標

上記の目的を達成するため、以下の研究開発を行う。

なお、定量的目標については、技術的観点を中心に設定しているが、経済的観点も含めた目標設定について、検討を進める。

(1) 全体システム

① 概念設計

- ・水素製造、水素輸送・貯蔵、水素利用にわたる全体システムの概念設計を、水素を含む各種輸送媒体について行う。また、これらを二酸化炭素排出削減等地球環境保全効果、エネルギー効率、経済性、技術的可能性、安全性等の観点から評価し、最適輸送媒体を選定する。

② 安全対策

- ・水素の安全性に関する調査研究を行い、安全確保のための技術開発課題を抽出する。

③ その他

- ・本プロジェクトに関連する国際的情報交流を推進するとともに、国際協力に発展させていくための方策を検討する。
- ・水素エネルギーの社会への導入効果を推定する。
- ・後述(2)～(4)の各研究開発項目との間の調整等を行うとともに、(2)～(5)

の成果を評価し、全体システムの最適化に資する。

(2) 水素製造技術

- ・ 固体高分子電解質水電解法に関する技術開発を行い、電流密度 1 A/cm^2 以上、エネルギー効率90%程度を維持しつつ、電極面積 $2,500 \text{ cm}^2$ のセルを実現する。

その際、電解質膜、給電体、触媒電極をはじめとする電解槽構成要素の材料、構造、製造方式等について最適化を図る。

(3) 水素輸送・貯蔵技術

(ア) 大量輸送・貯蔵技術

- ・ 水素液化システム及び液体水素輸送・貯蔵システムについて、概念設計及び要素研究を行う。
- ・ 低温材料について、候補材料の液体水素温度雰囲気下の特性試験を行い、データベースを作成するとともに、使用条件に応じた材料の適性を明らかにする。

(イ) 分散貯蔵・輸送技術

- ・ 定置式設備及び移動体への適用を目的とし、有効水素吸蔵量 3重量%以上、放出温度 100°C 以下、5,000サイクル時の吸蔵能力が初期の90%以上である水素吸蔵合金を探索する。

(4) 水素利用技術

(ア) 水素燃焼タービン

- ・ 発電用水素－酸素燃焼タービンに関する調査研究及び要素技術開発を行い、タービン入口温度 1700°C の下で、発電端効率60%以上（高位発熱量基準）を達成し得る最適なサイクル、燃焼制御方式及びタービン翼冷却構造を決定する。
- ・ 補機類に関する調査及び概念設計を行う。
- ・ タービン入口温度 2000°C を目標に、超高温材料に関する基礎研究を行う。

(イ) その他の利用技術

- ・ 上記(ア)以外の水素利用技術に関する調査研究を行い、有望な利用技術については概念設計及び要素技術開発を行う。

(5) 革新的・先導的技術

水素製造、水素輸送・貯蔵及び水素利用に係る技術のうち、上記(2)～(4)以外の革新的・先導的技術についても併行的に調査及び基礎研究を行い、有望な技術を抽出する。

5. 研究開発の進め方

(1) 国際協力の促進

本研究開発は、水素エネルギーに関する広範な調査研究及び技術開発を含む総合的プロジェクトであり、また、本構想の実現には、世界的規模での取り組みが不可欠である。

このため、本分野に関して高い研究開発能力を有する内外の機関を参集し、効率的な推進を図るとともに、成果の内外への公表、関連研究機関との交流を推進し、当該分野における中核的役割を担うことを目指す。

また、国際機関、二国間等の国際的な場において、本プロジェクトへの参加及びその際の費用・役割分担、また同様の国際プロジェクト間の役割分担等の議論も含め、世界的規模の水素利用国際クリーンエネルギーネットワーク構築について積極的に提唱していく。

(2) 国内における協力の促進

国内にあっては、産学官の十分な連携を図り、大学及び国立試験研究機関の高度な研究能力を活用するとともに、産業界への技術移転を促進する。

(3) 研究開発の方式

- ・ 中核的技術については、同一課題について複数の方式を同時並行して実施させることにより、研究開発を促進する。

(4) 成果の評価

- ・ 得られた研究開発成果のうち、特に中核的技術については、国立研究機関の能力も活用しつつ厳正に評価し、優れた技術を選択する。
- ・ 平成10年度には、成果を総合的に評価し、その結果に基づいて次期計画について検討する。また、必要に応じ中間評価を行い、研究開発計画を見直す。

6. 研究開発スケジュール

年度	5	6	7	8	9	10
(1)全体システム						
①概念設計	←各種媒体のシステム設計→			×	←評価→	
②安全対策・評価技術	←調査・解析→					
③その他	←水素導入効果の推定→					
	←国際協力方策の検討→					
(2)水素製造技術	←電解法要素技術開発→					
(3)輸送貯蔵技術						
①大量輸送・貯蔵技術	←調査・概念設計→			×	←要素研究→	
	←低温材料の試験・評価→					
②分散輸送・貯蔵技術	←調査・概念設計→			×	←要素研究→	
(4)水素利用技術						
①水素燃焼タービン	←サイクル検討→					
	←燃焼制御技術開発→					
	←翼冷却技術開発→					
	←補機類調査→			×	←概念設計→	
	←超高温材料研究→					
②その他の利用技術	←調査・評価→			×	←概念設計・要素技術開発→	
(5)革新的・先導的技術	←調査・評価→			×	←基礎研究→	
				▲ 中間 評価		▲ 総合 評価

研究開発の全体構想

1. 研究開発の意義

地球温暖化を始めとする地球環境問題の顕在化により、環境負荷の少ないエネルギーの世界的な規模での導入が期待されている。一方、世界のエネルギー消費は増大しつつあり、化石燃料の枯渇ないし価格上昇が危惧される中、これに替わる新たなエネルギー源が求められている。このような期待に応えるには、世界に広くかつ豊富に賦存する、クリーンな再生可能エネルギーの地球規模での導入を図ることが重要である。しかし、再生可能エネルギーは地域的に偏在しており、そのままでは長距離輸送、貯蔵が出来ないこと等により、限定的な利用に止まっている。これを地球規模で効率的に利用するためには、世界各地の様々な種類・形態の再生可能エネルギーを生産から流通、消費段階まで一貫して取り扱える二次エネルギー体系の確立が必要である。その媒体として、環境負荷が最も少ないといわれる水素エネルギーに対する期待は大きい。水素は、再生可能エネルギーの輸送・貯蔵を可能とすることにより、化石燃料と同様の国際市場による取り引きを可能とし、国際エネルギー供給の多様化・安定化に資するとともに、クリーンなエネルギーの大規模な導入を促進するものと考えられる。また、再生可能エネルギーが多く賦存する国にとっては、水素は、輸出エネルギーとして、当該国の産業振興にも貢献し得るものと考えられる。

このため、発展途上国等に未利用の形で豊富に存在する水力、太陽光、風力等の再生可能エネルギーを水素等の輸送可能な形に転換し、世界の需要地に輸送し、発電、輸送用燃料、都市ガス等の広範な分野で利用するネットワークの導入を可能とすることを目的として、中核的な要素技術の開発及びシステム設計等を総合的に推進する。これにより、世界的規模での温室効果ガスの排出削減、国際エネルギー需給の緩和等、エネルギー・環境問題の同時解決に資する。

2. 研究開発期間

平成 5 ～ 3 2 年 (2 8 年間)

3. 研究開発の内容

(1) 全体システム

水素製造、輸送・貯蔵、水素利用にわたる全体システムについて、水素製造のための再生可能エネルギー賦存量、二酸化炭素排出削減効果、エネルギー効率、経済性、技術的可能性、安全性等を評価しつつ、その最適化設計を行う。

(2) 水素製造技術

固体高分子電解質水電解法について、他の電解法に比し格段の高効率化・高電流密度化を図りつつ、大規模化、長寿命化を達成させるために必要な要素技術を開発する。

また、これらを踏まえ、パイロットプラントの設計、建設、運転及び評価を行う。

(3) 水素輸送・貯蔵技術

(7) 大量輸送・貯蔵技術

水素液化技術、液体水素輸送・貯蔵技術及び液体水素以外の含水素化学媒体への転換・輸送・貯蔵技術について、基礎的研究及び要素技術の開発を行い、長距離輸送のための最適システムを決定する。

また、これらを踏まえ、技術の実証を行う。

(1) 分散貯蔵・輸送技術

水素吸蔵合金等による水素輸送・貯蔵技術について、吸蔵能力及び耐久性の向上等に係る基礎的研究及び要素技術の開発を行い、分散貯蔵・輸送技術のための最適システムを決定する。

また、これらを踏まえ、技術の実証を行う。

(4) 水素利用技術

(7) 水素燃焼タービン

発電用水素燃焼タービンについて、各種サイクルの評価、燃焼制御、翼冷却構造、材料等に関する基礎的研究及び要素技術の開発を行い、最適システムを決定する。

また、これらを踏まえ、パイロットプラントの設計、建設、運転及び評価を行う。

(1) その他の利用技術

発電用水素燃焼タービン以外の水素利用技術について、概念設計、基礎的研究及び要素技術開発を行う。

また、これらを踏まえ、技術の実証を行う。

(5) 革新的・先導的技術

水素製造、水素輸送・貯蔵及び水素利用に係る技術のうち、上記(2)～(4)以外の革新的・先導的技術についても併行的に調査及び基礎研究を行う。

(6) 水素エネルギー実証システムの構築

(1)～(5)を踏まえつつ、国際協力の下で水素エネルギー実証システムを構築する。

4. 研究開発の進め方

(1) 国際的展開

本研究開発を「国際大型共同研究」として位置づけ、内外の産学官の参集、

国内外への研究成果の公表、関連研究機関との交流推進を図る。これにより、世界の中で、当該分野における中核的役割を担うことを目指す。

(2) 研究開発のステップ

全期間を以下の３段階に分け、研究開発を推進する（別紙参照）。

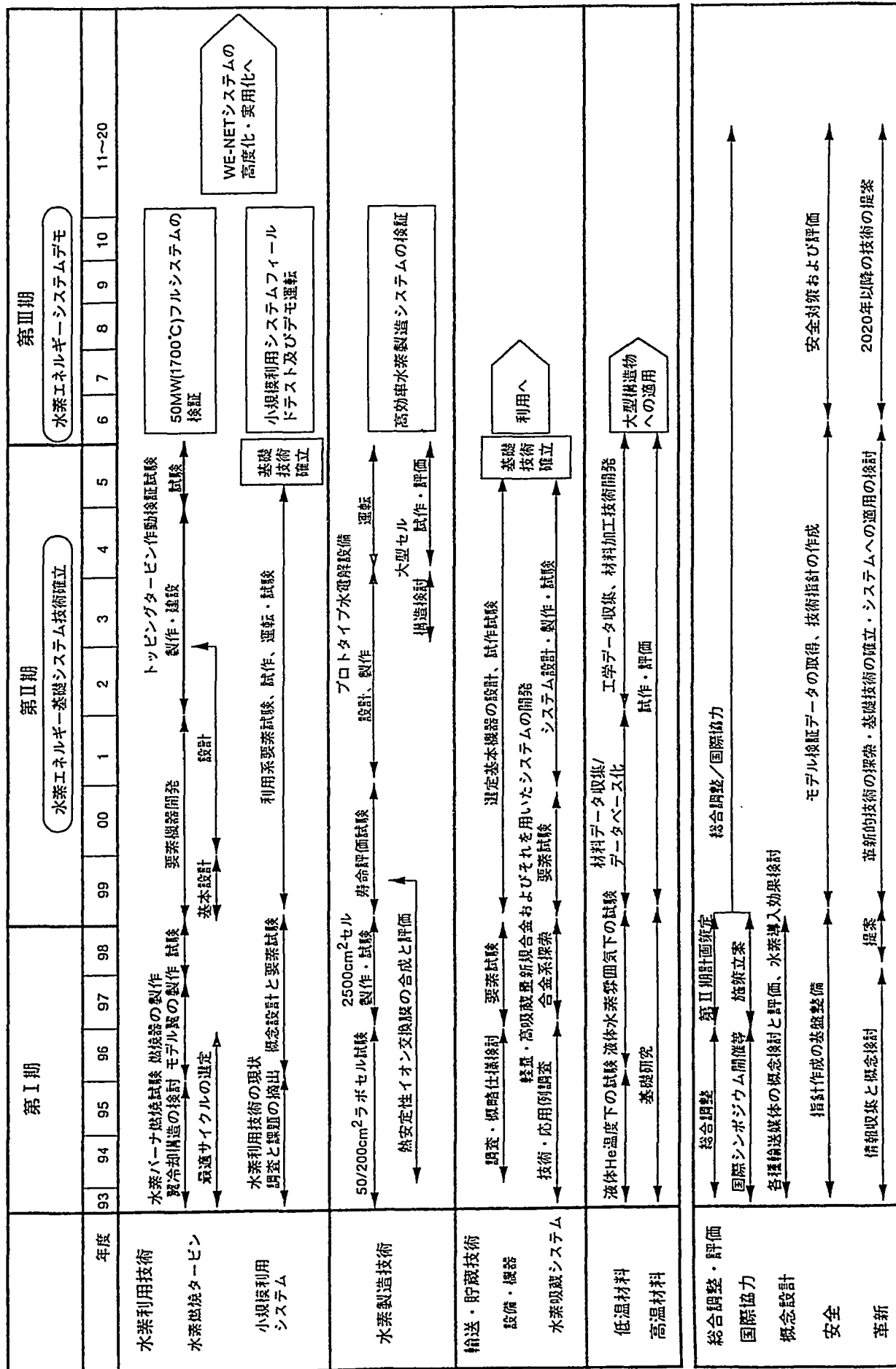
- ① 第Ⅰ期：全体システムの概念設計、中核的要素技術の研究開発等。
- ② 第Ⅱ期：全体システムの最適化設計、要素技術開発、小規模プラント開発・運転評価を行い、国際的な実証システム構築に必要な技術基盤を確立。
- ③ 第Ⅲ期：国際協力の下で水素エネルギー実証システムを構築。

(3) 成果の評価

各段階の終了時においては、総合的評価を行い、当該段階で得られた新しい知見を十分に織り込みつつ、次段階の計画の見直しを行う。

（NEDO注記） 2. 1 の記述については、平成 8 年 3 月 22 日、通商産業省工業技術院で開催された産業技術審議会エネルギー・環境部会の審議を経て決定された第Ⅰ期研究開発基本計画を原文のまま掲載した。

WE-NET年次展開イメージ



2. 2 研究開発体制及び実施方法

(1) 研究開発体制

① 予算額の推移

本プロジェクトは、平成5年度より、通商産業省からの補助金を受けて当機構が実施している。以下に平成5～8年度の予算額の推移を示す。

表2.1 WE-NET予算額の推移

(単位：百万円)

年度	5	6	7	8
予算額	2 5 5	8 6 2	1 0 9 0	1 5 6 5

② 委託研究開発

本プロジェクトの研究開発については、原則、研究項目毎に当機構から以下の機関に委託して実施している。現時点における研究開発体制を図2.1に示す。研究項目は大きく(1)～(5)の5つに分かれるが、実施に当たっては分野別に9つのサブタスクに分けて、各々学識経験者等から構成される委員会を設け、実際の研究開発内容の方向付けや成果の技術的な評価について審議・検討を行っている。

- ・サブタスク1－(財)エネルギー総合工学研究所
- ・サブタスク2－(財)エンジニアリング振興協会
- ・サブタスク3－電源開発(株)、(財)電力中央研究所、ロンドンリサーチ/インベリア
ル・レッシ、(財)エネルギー総合工学研究所
- ・サブタスク4－(財)エンジニアリング振興協会
- ・サブタスク5－(財)エンジニアリング振興協会
- ・サブタスク6－(財)金属系材料研究開発センター
- ・サブタスク7－(財)エンジニアリング振興協会
- ・サブタスク8－(財)電力中央研究所、(財)発電設備技術検査協会
- ・サブタスク9－(財)エネルギー総合工学研究所

システム技術（W E - N E T）研究開発体制表

サンシャイン計画推進本部

助金

合開発機構（N E D O）

水素利用国際クリーンエネルギーシステム 技術開発委員会

託

技術

5〔エン振協〕
貯蔵技術の開発

水素液化設備
の開発

水素輸送
タンカーの開発

水素貯蔵設備
の開発

共通機器類
の開発

輸送・貯蔵用
吸蔵合金の開発

6〔JRCM〕
技術の開発

(4)水 素 利 用 技 術

サブタスク8〔電中研〕
〔発電技検〕
水素燃焼タービンの開発

①最適システムの評価
〔財電力中央研究所〕

②燃焼制御技術開発
〔財電力中央研究所〕

③主要構成機器の開発
〔財発電設備技術検査協会〕

④主要補機類の開発
〔財発電設備技術検査協会〕

⑤超高温材料の開発
〔財電力中央研究所〕

サブタスク7〔エン振協〕
水素利用技術に
関する調査・研究

(5)革新的・先導的技術

サブタスク9〔エ総工研〕
革新的・先導的技術に
関する調査・研究

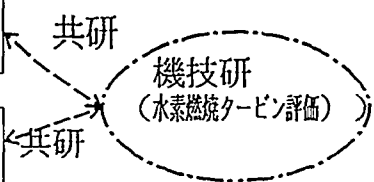
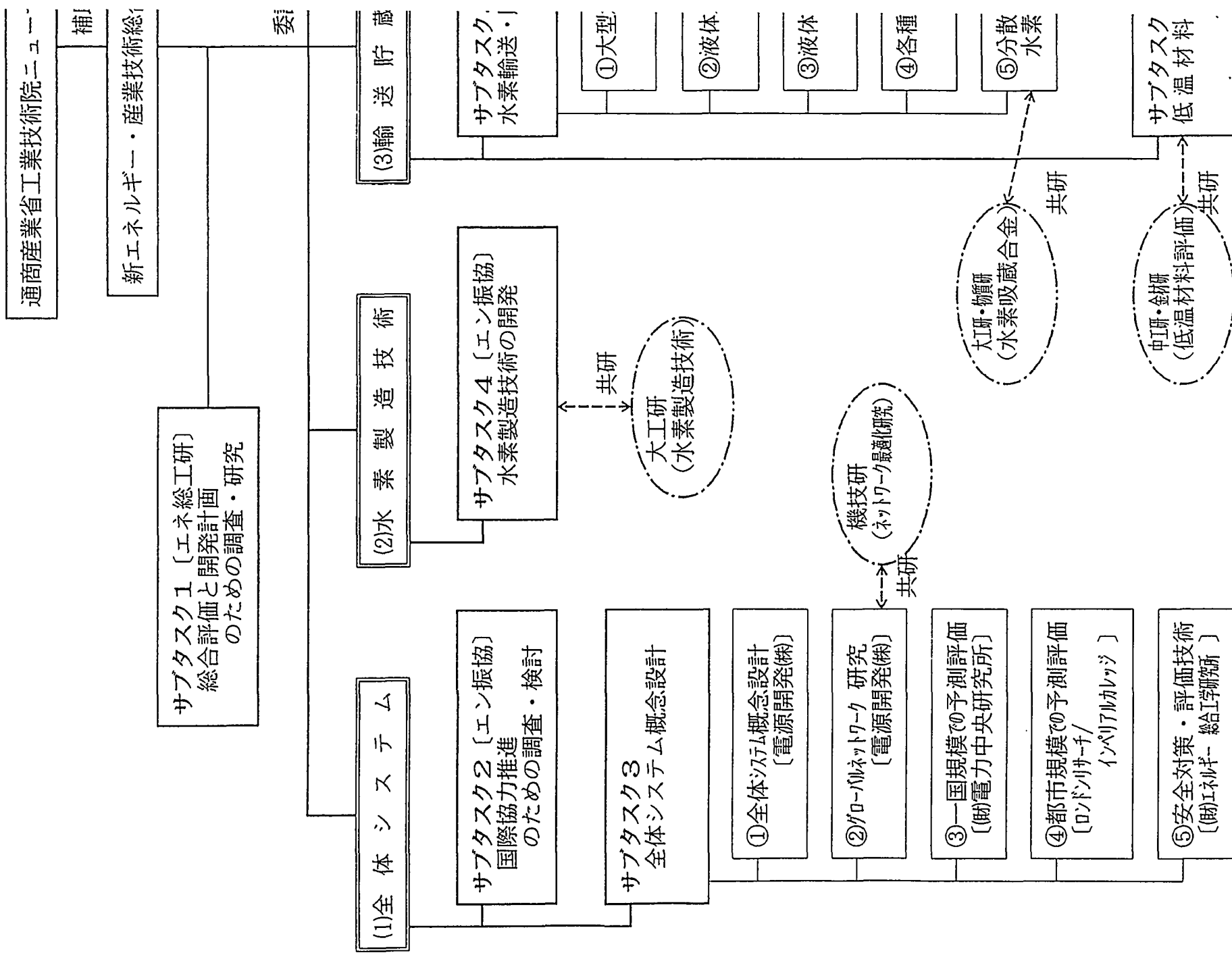


図 2. 1 水素利用国際クリーンエネルギー・



(2)実施方法（各サブタスク概要）

本プロジェクトの実施方法の特徴を列記すると以下の４点となる。

第１は、本プロジェクトの内容がプロジェクトの性格上、多種・多様な技術から構成されており、プロジェクトフォーミングを行いながら進める必要があることからプロジェクト全体の調整・舵取りを行うための部門（サブタスク１）を設けていることである。第２は、W E－N E Tの全体構想において国際協力が不可欠とされることから、これを円滑に進めるための国際協力部門（サブタスク２）を設けている点である。第３は、現在開発対象としていない革新的・先導的技術であっても有望なものについては迅速に抽出できるような検討の場（サブタスク９）を設けていることである。第４は、国立研究所との協力体制であり、主要な分野については関連研究所と共同研究を行い、国立研究所の知見、能力をフルに活用しつつ進めている点である。

以下に各サブタスクの概要を記す。

①サブタスク１－総合評価と開発計画のための調査・研究

水素製造、水素輸送・貯蔵技術、水素燃焼タービンを含む水素利用等の各システムを構成する個別技術開発についてプロジェクト全体の恒常的な総合調整、開発成果の総合評価及び開発計画最適化のための検討を行う。合わせて内外の技術開発動向を調査し、今後のプロジェクトに反映させる。

②サブタスク２－国際協力推進のための調査・検討

世界的規模のシステムを目指して国際機関、関係各国との定期的情報交換等を行うとともに国際的共同研究として発展させていくための進め方・方策等の検討を行う。

③サブタスク３－全体システム概念設計

再生可能エネルギー利用発電設備、水素製造設備、輸送媒体製造設備、貯蔵設備、輸送設備、水素燃焼タービンから構成される全体システムの概念設計を行い、技術的・経済的評価を実施する。また、世界的規模、一国規模での水素エネルギー導入効果を推定する。さらに全体システムから見た安全

対策・安全評価技術開発を行う。

④ サブタスク 4－水素製造技術の開発

高効率化・高密度化が期待できる固体高分子電解質水電解法について、大規模化、長寿命化を達成させるために必要な調査を行い、固体高分子電解質膜（イオン交換膜）、陽・陰極触媒、電解槽部品の材質等の要素技術開発を行う。

⑤ サブタスク 5－水素輸送・貯蔵技術の開発

液体水素製造技術、輸送・貯蔵技術等に関する以下の項目について、必要な調査、基礎的研究及び要素技術開発等を行い、長距離海上輸送及び分散輸送・貯蔵のための最適システム決定に必要な知見を得る。

(a) 大型水素液化設備の開発

(b) 液体水素輸送タンカーの開発

(c) 液体水素貯蔵設備の開発

(d) 各種共通機器類の開発

(e) 分散輸送・貯蔵用水素吸蔵合金の開発

⑥ サブタスク 6－低温材料技術の開発

現状において液体水素温度領域（20 K）における構造材料の靱性、疲労及びセレーションに関するデータが殆どないため、各種既存材料を調査し有望な材料について基礎データの取得を行う。また、必要に応じ新規材料開発も行うこととし、液体水素条件で利用できる構造材料とその適正溶接法を検討し、併せて上記⑤水素輸送・貯蔵技術の開発に関する材料側からの要求条件を決定する。

⑦ サブタスク 7－水素利用技術に関する調査・検討

将来における水素エネルギーの利用技術及び需要量について、電力用、産業用、輸送用、民生用の分野毎に、水素ガス、液体水素、メタノール等の化学媒体等の各利用形態別に調査・検討、利用技術の提案を行い、各技術の得

失を明確にするとともに、開発課題を抽出する。また、検討した各水素利用技術について、必要に応じ要素技術開発を行う。

⑧ サブタスク 8－水素燃焼タービンの開発

水素利用技術の一つとして、画期的高効率が期待できる水素燃焼タービンについて、以下の項目について必要な調査、要素技術開発等を行い、パイロットプラント開発のために必要な技術を確立する。

- (a) 水素燃焼タービン最適システムの評価
- (b) 燃焼制御技術開発
- (c) タービン翼、ロータ等主要構成機器の開発
- (d) 主要補機類の開発
- (e) 超高温材料の開発

⑨ サブタスク 9－革新的・先導的技術に関する調査・検討

第 I 期の研究開発の対象外であるが、将来的には、新たな有望技術が構成技術として適用できる可能性がある。従って、有望と思われる革新的・先導的技術、在来型技術についても調査・検討・評価を行い、必要に応じて基礎研究を行うことにより、有望技術を本プロジェクトに反映させることとしている。

第3章 研究開発の実施状況及び成果

第2章に述べた研究開発基本計画及び研究開発体制に基づき、本プロジェクトは平成5年度に開始され、現在（平成8年度途中）に至っている。現在までの本プロジェクトの実施状況及び成果を、研究開発の項目毎に以下に記述する。

なお、平成8年度の最終的な成果は年度末をもって確定することとなるが、今次中間評価のために特に平成8年12月における途中経過を報告することとした。したがって、個々の研究開発によって得られた詳細な内容（目標値に対する実績値の到達度、概念設計によって得られた各システムの仕様等）については、若干の変更があり得ることを考慮する必要がある。

3. 1 全体システム

3. 1. 1 概念設計

水素の製造から利用までのシステム（以下「全体システム」と言う。）について実用規模の概念設計を行い、その構成を描き出すとともに、エネルギー収支、水素コスト等の試算、分析等を行っており、個々の研究開発の目標を第1期の最終年度である平成10年度までに提示することとしている。

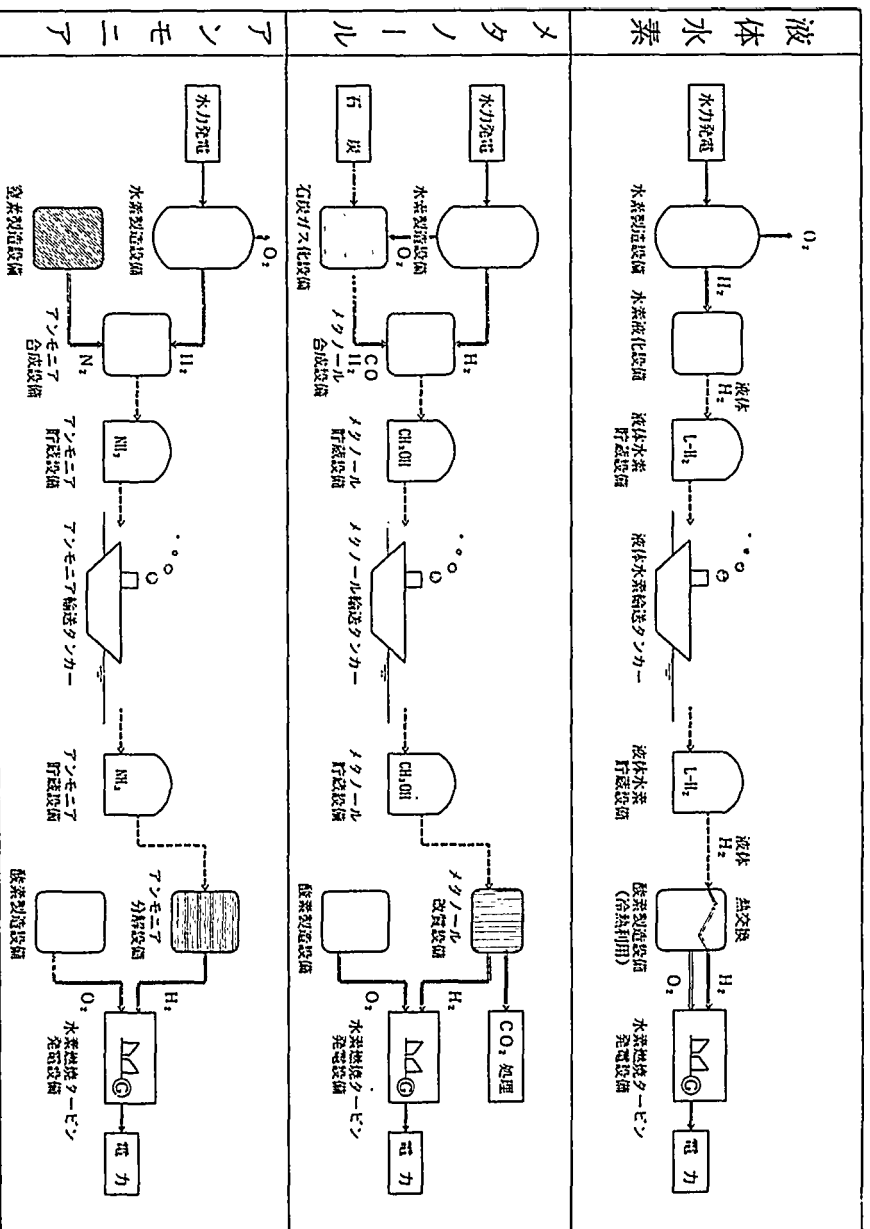
具体的には、水電解による水素の製造、液体水素による大量輸送・貯蔵及び水素燃焼タービン発電からなる全体システムの中から、実用規模で必要となる構成要素を洗い出し、これらの構成要素に対する適用可能な技術を選定し、概念設計のベースとなる全体システムを設定した。また、適用可能な技術の選定に当たっては、個別技術の現状及び海外類似プロジェクトの現状を調査した。

次に、この全体システムについての概念設計を行い、コスト試算及び分析を実施した。コスト試算に当たっては、再生可能エネルギーの供給源を当面水力発電によるものとし、その発電規模は需要地での所要発電規模などから1,000～4,000MW、輸送距離は想定される供給地域と需要地域の距離から5,000～20,000kmに設定した。また、電力単価は水力資源が豊かな国々における水力発電単価2～5円/kWhに設定した。液体水素システムの設計条件、ユニット設備費及び年経費率を表3.1-1～3に示す。

さらに、既存技術から構成されるシステムとしてメタノール及びアンモニアを海上輸送媒体とした全体システムの概念設計を行い、コスト試算、分析を実施した他、液体水素による全体システムと比較した。

なお、水素の最終利用に当たる水素燃焼タービンの発電所の規模については、現在実用化している1300℃級のLNG複合発電設備の単機（一軸）容量（350MW程度）の大きさ等に鑑み、1700℃水素燃焼タービン単機容量を500MW、発電所全体として1000MW（500MW×2基）と設定した。

W E - N E T 全体システム構成



また、概念設計、コスト試算及び分析を効率的に行うために計算機ソフトウェアを開発した。

各輸送媒体に対するこれらの検討の結果、以下の成果が得られた。

(1)液体水素

液体水素を水素輸送媒体とした場合の全体システムのフロー図を図3.1-1に示す。この全体システムのエネルギー収支は表3.1-4に示すとおりとなる。工程上のエネルギーの損失を差し引いて計算したシステム効率は需要地への水素到着時点で約70%、水素燃焼タービン発電送電端で約37%となった。エネルギーの損失は、水素液化で約20%、水素製造で約8%、水素燃焼タービン発電で約32%が失われることになる。

表3.1-4 エネルギー収支ケース（基本ケース）

（単位：％）

ケース		1	2	3	4	5	6
条件	電力規模 (MW)	1,000	1,000	1,000	4,000	4,000	4,000
	輸送距離 (km)	5,000	10,000	20,000	5,000	10,000	20,000
水力発電エネルギー		100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
損失	水素製造損失	7.9	7.9	7.9	7.9	7.9	7.9
	水素液化損失	19.8	19.8	20.0	19.8	19.8	19.8
	輸送中気化損失	0.7	1.4	2.8	0.7	1.4	2.8
	その他損失	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2
水素エネルギー		70.4	69.7	68.1	70.4	69.7	68.3
水素発電エネルギー		37.7	37.2	36.5	37.7	37.3	36.6

注) 水素エネルギーは水素到着ベース、水素発電エネルギーは送電端電力量ベースである。

コスト試算については、水力発電単価2円/kWh、輸送距離5,000km、水素燃焼タービン発電出力1,000MW、送電端電力量ベースで32.64円/kWhとなった。輸送媒体を液体水素、メタノール、アンモニアとした場合のコストの内訳を図3.1-2に示す。液体水素を使用する場合、発電コストのうち、最も大きな比重を占めるのは消費地側での液体水素貯蔵工程であることが明らかとなった。

(2)メタノール

メタノールを水素輸送媒体とした場合の全フロー図を図3.1-3に示す。また、全体システムのエネルギー収支を表3.1-5に示す。この場合、到着時点のシステ

ム効率は約60%で、メタノール合成損失が大きく、23%を占める。さらに水素分離工程で、10%が失われ、炉前の効率は50%程度となる。コスト試算については、水素輸送媒体を液体水素としたときと同じ条件で試算すると、24.70円/kWhとなった。図3.1-2に示したコスト内訳で、もっとも比重を占めるのは、メタノール改質設備である。

メタノールを輸送媒体とする全体システムは、メタノールを水素と二酸化炭素に分離するため、二酸化炭素の排出抑制策が別途必要となる。そこで、二酸化炭素を回収し、パイプラインにより輸送し、地中で処理する場合のエネルギー効率及びコストを計算した。その結果、二酸化炭素処理のプロセスを加えると、システム効率は約4%低下し、コストは6～8円/kWh上昇することが明らかになった。

③ アンモニア

アンモニアを水素輸送媒体とした場合の全フロー図を図3.1-4に示す。また、全体システムのエネルギー収支を表3.1-6に示す。この場合、消費地への到着時点のシステム効率は約69%で、一次エネルギー供給側におけるアンモニア合成での損失が大きく、17%を占める。さらに消費地側でのアンモニア改質・水素分離で16%が失われ、水素燃焼タービン直前での効率は53%程度となる。コスト試算では、水素輸送媒体を液体水素としたとき同じ前提及び発電ベースで32.94円/KWhとなった。図3.1-2に示したコスト内訳で、もっとも大きな比重を占めるのは、一次エネルギー供給側における水力発電及び消費地における水素燃焼タービン発電、つづいてアンモニアの改質（水素発生）であった。

以上の結果は、液体水素の貯蔵・輸送の技術に関する技術開発の必要性を示唆するものと考えられる。

すなわち、メタノール又はアンモニアの輸送・貯蔵技術はほぼ確立しているものの、技術的に未成熟な液体水素を輸送媒体とした場合の全体システムに対し、経済性優位性を有しているとは言えない。メタノールについては、コストは相対的に小さいが、消費地で水素を再生成する際に多くのエネルギーが必要であり、かつ、二酸化炭素が発生し、その処理コストが付加される。メタノー

ルを直接発電に供した場合であっても、二酸化炭素が発生する点は変わりはない。なお、本計算においては、メタノールの合成の際に化石燃料（石炭）を炭素源としており、本プロジェクトの目的が再生可能エネルギーの利用という観点からすると、最適なシステムとは言い難い。アンモニアを輸送媒体とする場合は、空気中の窒素を利用することから、二酸化炭素は発生しないものの、水素の再生成に多くのエネルギーを消費し、現地点でも液体水素よりコストが高い。

これらに比べ、液体水素を輸送媒体とする場合は、今後の技術革新に伴い、大幅なコストダウンも期待され得る。結論としては、現時点で、2030年以降の水素エネルギーの輸送媒体として、何が最も有望であるかは決定できない。したがって、現時点では、まず、技術的に未成熟な液体水素の輸送・貯蔵技術の開発に着実に取り組んでいくことが重要であると考えられる。

表 3.1 - 1

設計条件

項 目	試算条件
水素製造設備	
水素製造電力原単位	4.43~3.94 kWh/m ³ N
最大容量	33,840 m ³ /h
最小系列数	1 系列
水素液化設備	
設備稼働率	90 %
水素液化電力原単位	0.93 kWh/m ³ N
最大容量	300 t/日
最小系列数	1 系列
液体水素貯蔵設備(積地)	
補機電力原単位	0.055 kWh/m ³ N
受入時気化率	1 %
貯蔵中気化率	0.1 %/日
払出時気化率	0.53 %
容積余裕率	25 %
最大容量	50,000 m ³
最小系列数	1 系列
液体水素輸送タンカー	
年間航海日数	350 日
航行速度	20~25 kn
積荷日数	1 日
揚荷日数	1 日
積荷時間	20 時間
揚荷時間	20 時間
受入時気化率	1.3 %
輸送中気化率	0.2~0.4 %/日
払出時気化率	0.53 %
積付率	100 %
最大容量	200,000 m ³
最小隻数	2 隻
液体水素貯蔵設備(揚地)	
補機電力原単位	0.017 kWh/m ³ N
備蓄日数	30 日
受入時気化率	1.25 %
貯蔵中気化率	0.1 %/日
容積余裕率	0 %
最大容量	50,000 m ³
最小系列数	1 系列
水素燃焼タービン発電設備	
発電端効率	60.0 %
送電端効率	54.0 %
設備利用率	70 %
最大出力	500 MW
最小系列数	2 系列

表 3.1 - 2 設備費

	ユニット規模	設備費 (億円)	スケール ファクター	備 考
水素製造設備	33,840 m ³ N/h	68	0.87	受変電・配電設備費を含む
水素液化設備	300t/day	490	0.65	窒素製造装置、窒素液化装置、受変電・配電設備費を含む
液体水素貯蔵設備(積地)	250,000 m ³	1,240	0.67	配電設備費を含む受変電設備費は水電解設備に含む
液体水素タンカー	200,000 m ³	500	0.65	乗り出し比率 5 %
液体水素貯蔵設備(揚地)	250,000 m ³	1,440	0.67	配電設備費を含む 受変電設備費は水素燃焼タービン発電設備に含む
水素燃焼タービン発電設備	500MW	1,030	0.77	

表 3.1 - 3 年経費率

(単位: %)

	水素製造 設備	水素液化 設備	貯蔵設備 (積地)	液体水素 タンカー	貯蔵設備 (揚地)	水素燃焼 タービン
減価償却費	9.0	9.0	9.0	6.0	9.0	6.0
事業報酬	5.2	5.2	5.2	5.3	5.2	5.3
固定資産税	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7
保 險	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6
補 修 費	2.0	3.0	3.0	2.0	3.0	4.0
人 件 費	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
ユーティリティ費	0.0	0.2	2.8	0.0	3.6	0.0
一般管理費	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
合 計	18.8	20.0	22.6	15.9	23.4	17.9
耐用年数	10年	10年	10年	15年	10年	15年

表3.1-5 メタノールシステムのエネルギー収支

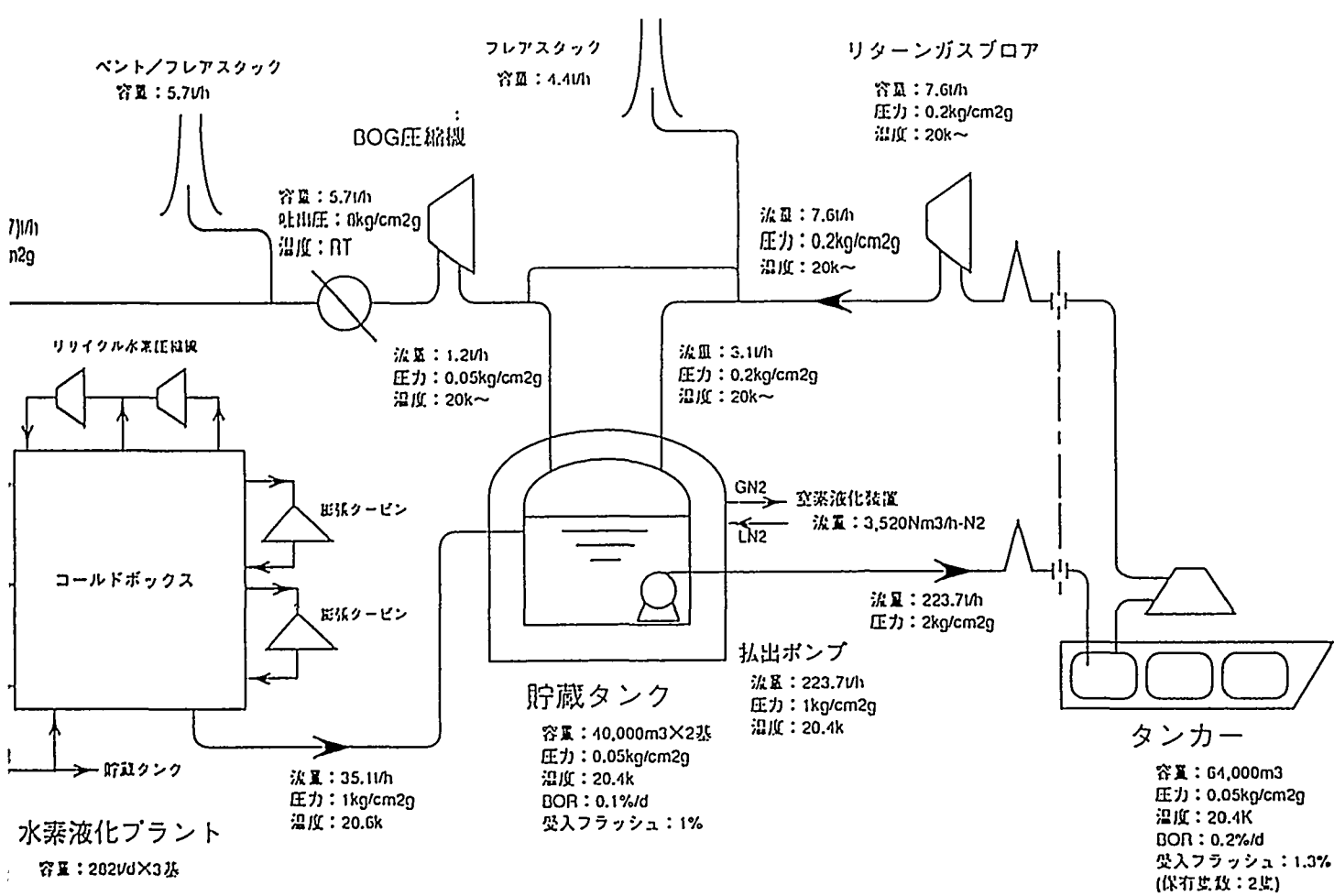
(単位：%)

ケース		1	2	3	4	5	6
条件	水力発電規模 (MW)	1,000	1,000	1,000	4,000	4,000	4,000
	輸送距離 (km)	5,000	10,000	20,000	5,000	10,000	20,000
入力	水力発電エネルギー	52.7	52.7	52.7	52.7	52.7	52.7
	石炭エネルギー	47.3	47.3	47.3	47.3	47.3	47.3
	入力計	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
損失	水素製造損失	7.3	7.3	7.3	7.3	7.3	7.3
	石炭ガス化損失	6.1	6.1	6.1	6.1	6.1	6.1
	メタノール合成損失	23.4	23.4	23.4	23.4	23.4	23.4
	輸送中損失	1.8	2.5	3.8	1.0	1.6	3.0
	小計	38.6	39.3	40.6	37.8	38.4	39.8
メタノール到着エネルギー		61.4	60.7	59.4	62.2	61.6	60.2
改質・精製損失		10.3	10.2	10.0	10.5	10.4	10.1
水素エネルギー		51.0	50.4	49.4	51.7	51.2	50.0
タービン熱損失		20.4	20.2	19.8	20.7	20.5	20.0
所内電力損失		5.9	5.8	5.7	6.0	5.9	5.8
水素発電エネルギー		24.7	24.5	23.9	25.1	24.8	24.3

表3.1-6 アンモニアシステムのエネルギー収支

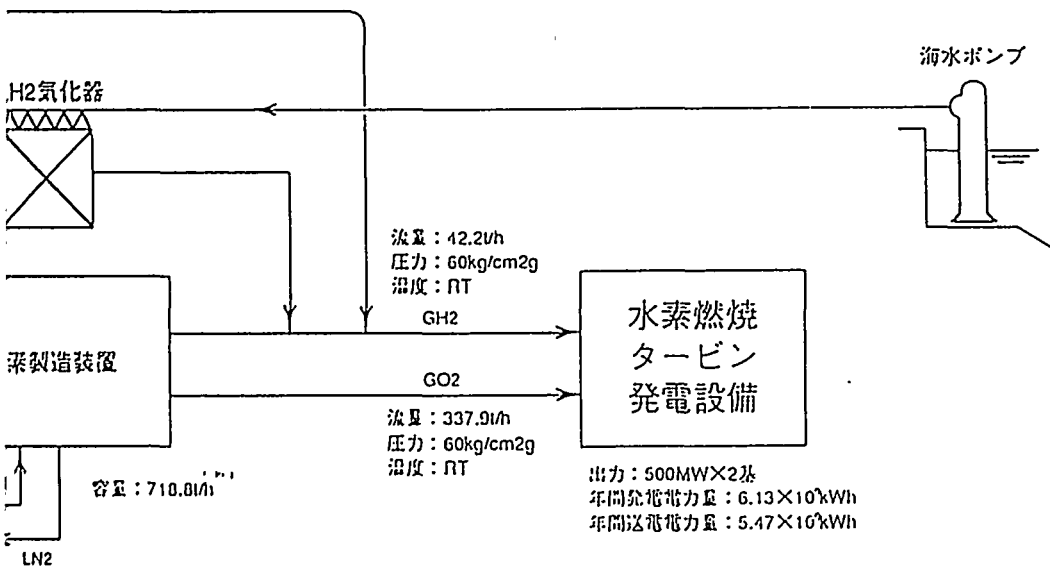
(単位：%)

ケース		1	2	3	4	5	6
条件	水力発電規模 (MW)	1,000	1,000	1,000	4,000	4,000	4,000
	輸送距離 (km)	5,000	10,000	20,000	5,000	10,000	20,000
入力	水力発電エネルギー	97.6	96.5	93.6	98.2	96.7	93.6
	重油エネルギー	2.4	3.5	6.4	1.8	3.3	6.4
	入力計	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
損失	水素製造損失	12.7	12.5	12.1	12.7	12.5	12.1
	窒素製造損失	2.0	2.0	1.9	2.0	2.0	1.9
	アンモニア合成損失	14.7	14.6	14.2	14.9	14.6	14.2
	輸送中損失	2.4	3.5	6.4	1.8	3.3	6.4
	小計	31.8	32.6	34.6	31.4	32.4	34.6
アンモニア到着エネルギー		68.1	67.4	65.3	68.6	67.5	65.3
アンモニア分解・精製損失		15.4	15.2	14.8	15.5	15.3	14.8
水素エネルギー		52.8	52.2	50.6	53.1	52.3	50.6
タービン熱損失		21.1	20.9	20.2	21.2	20.9	20.2
所内電力損失		8.9	8.8	8.6	9.0	8.8	8.6
水素発電エネルギー		22.7	22.5	21.8	22.9	22.5	21.8



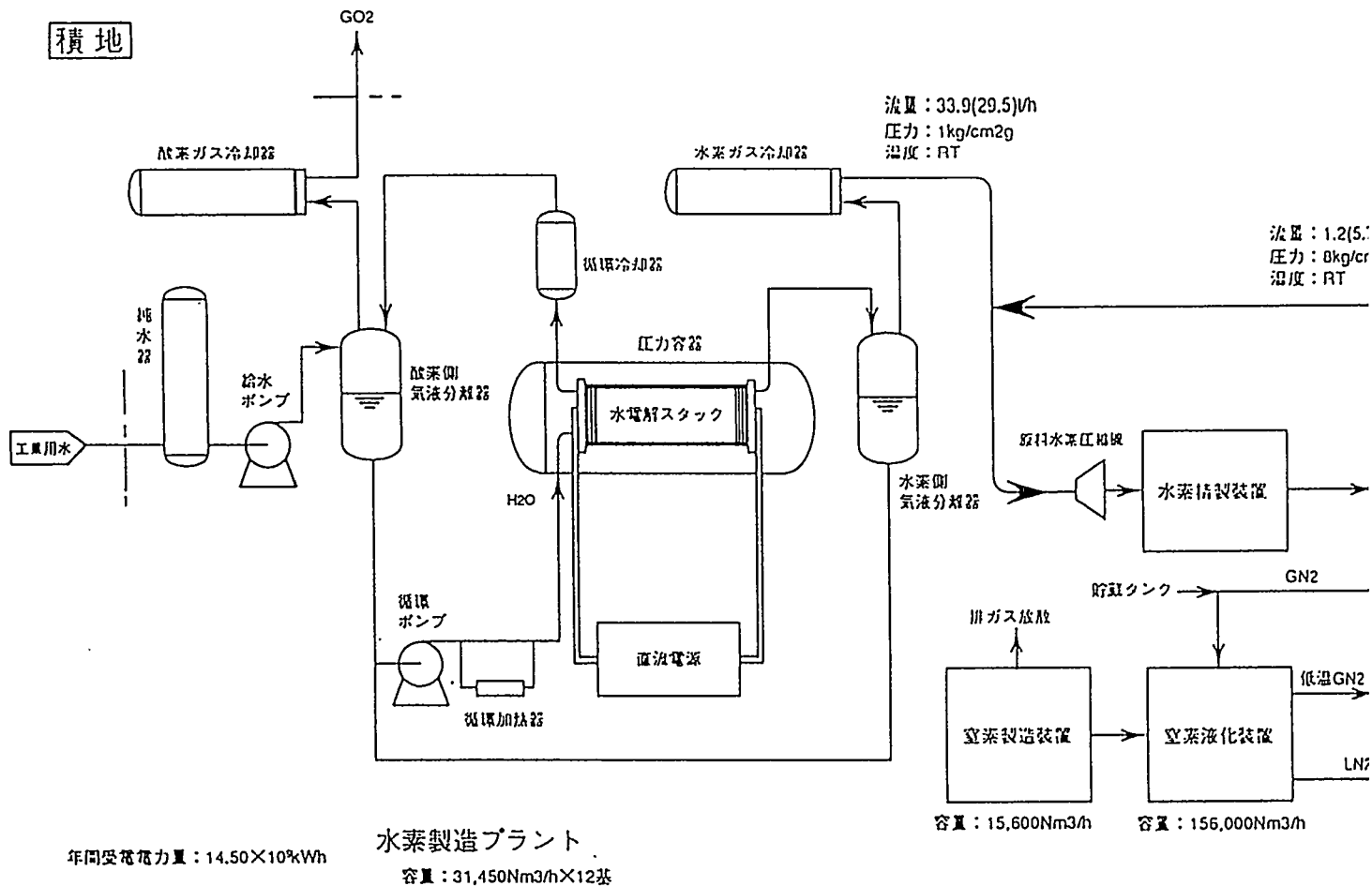
水素燃焼タービン発電出力：1,000 MW
輸送距離：5,000 km

※ ()内は荷役時の流量



コ — (液体水素)

積地



揚地

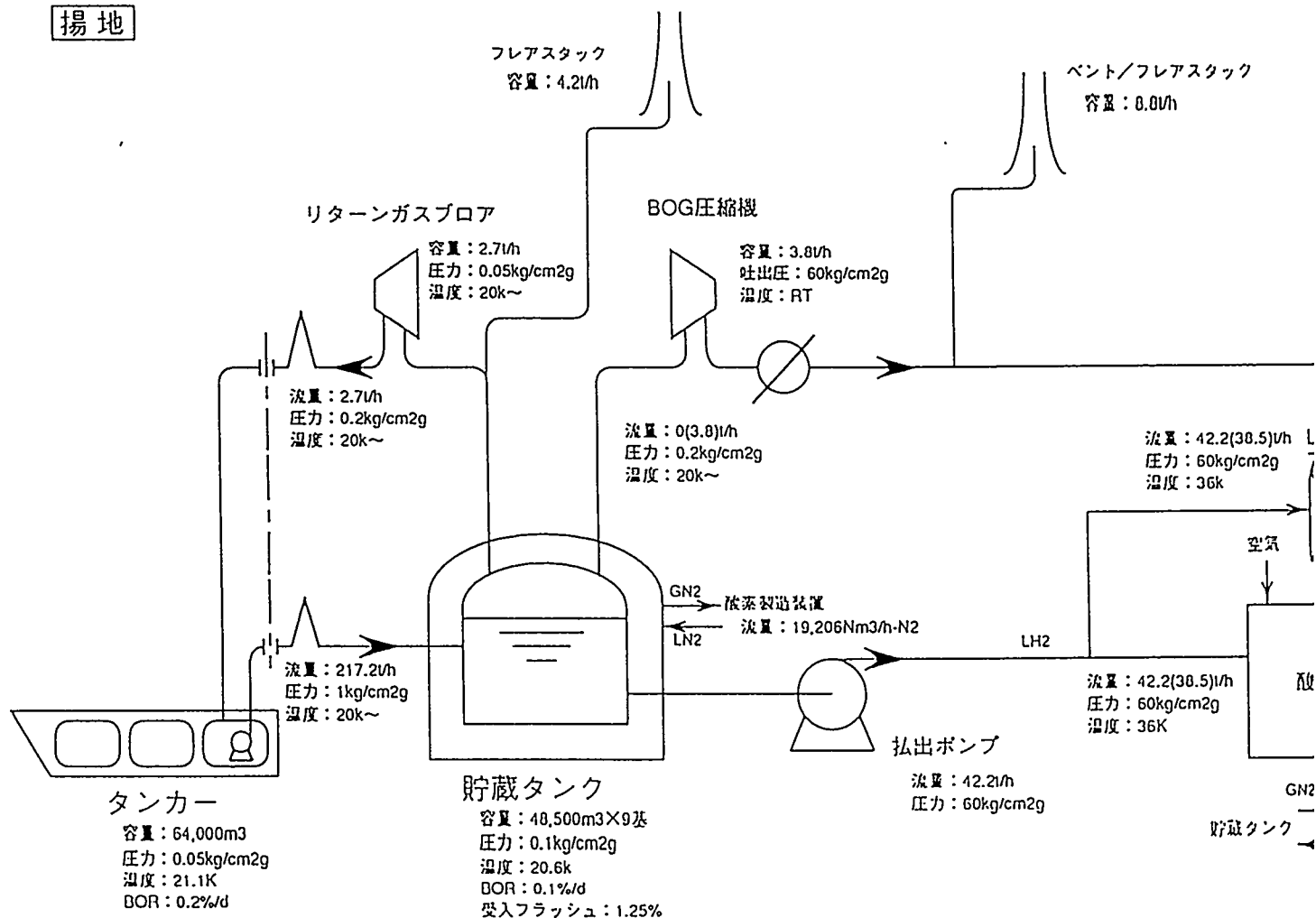


図 3.1 - 1 システムフロ

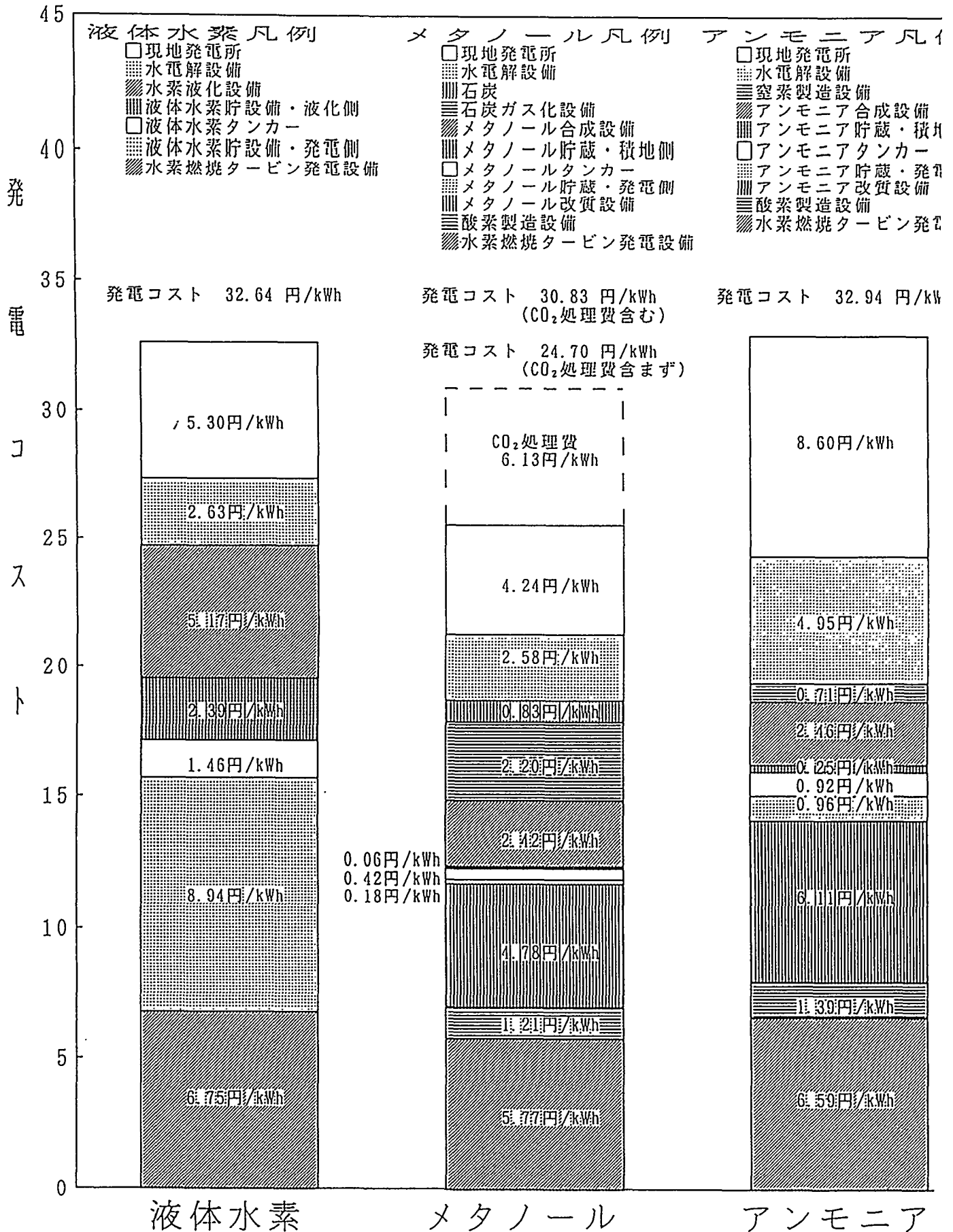
		設備容量	系列数	設備費	発電コスト	備 考
液 体 水 素	水力発電所	1,859MW	—	—	5.30	水力発電所の発電コストは、水電解設備、液化設備、貯蔵設備（積地）の電力料相当分である
	水電解設備	31,450 m ³ /h	12	768	2.63	
	液化設備	282 t/d	3	1,413	5.17	
	貯蔵設備（積地）	40,000 m ³	2	580	2.39	
	液体水素タンカー	64,000 m ³	2	500	1.46	
	貯蔵設備（揚地）	48,599 m ³	9	2,088	8.94	
	水素燃焼タービン	500MW	2	2,060	6.75	
	合 計	—	—	7,409	32.64	

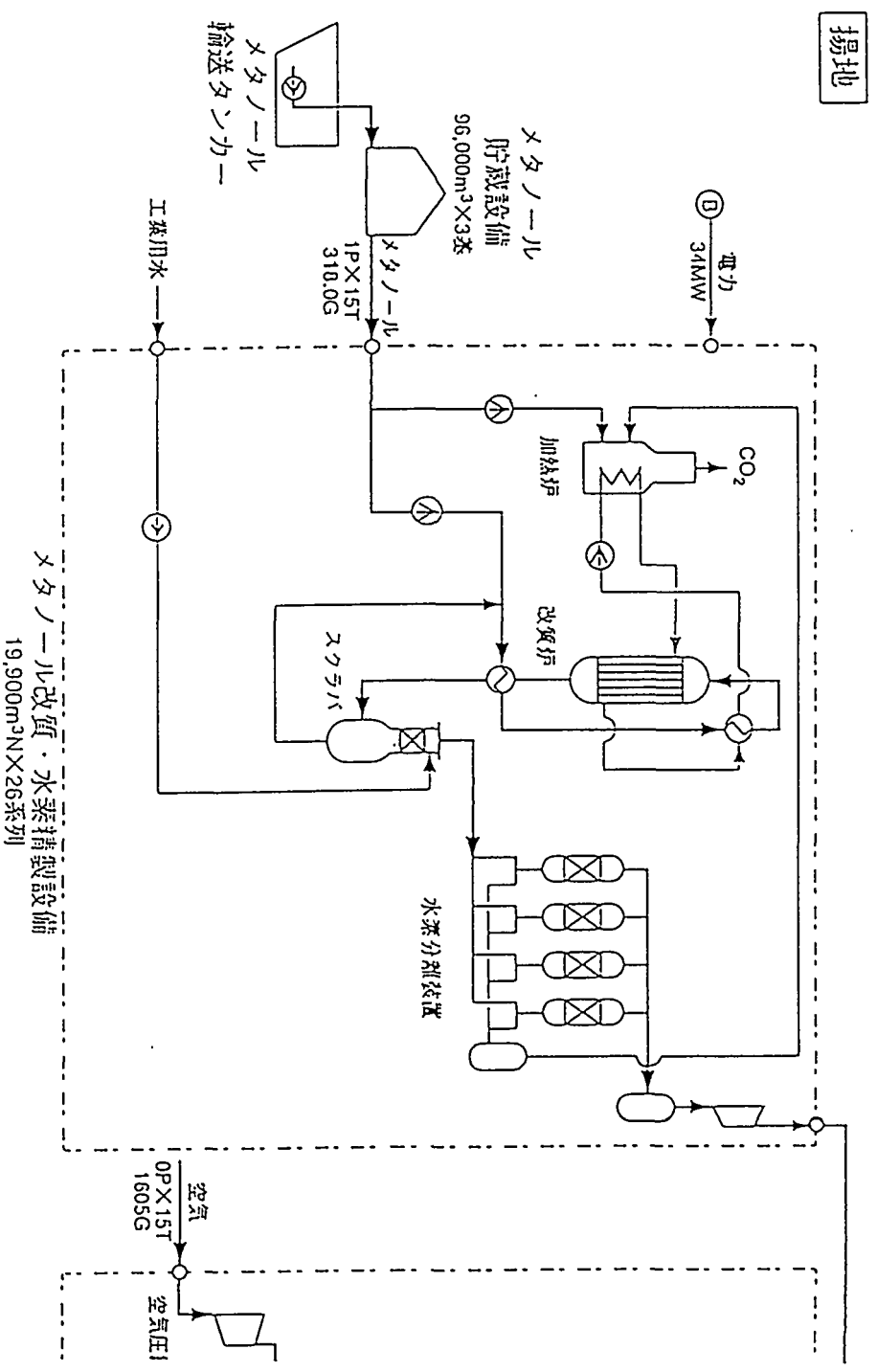
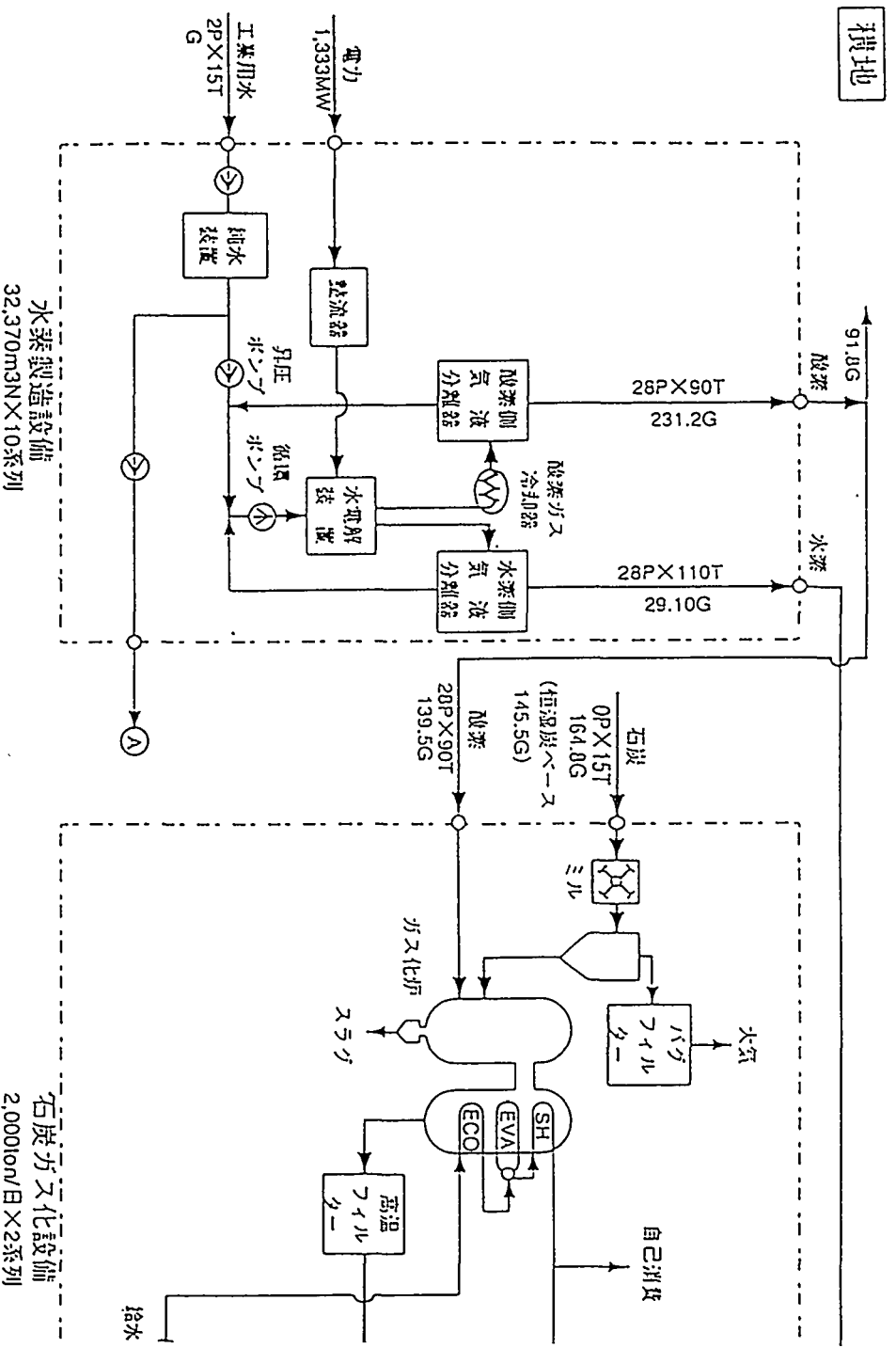
		設備容量	系列数	設備費	発電コスト	備 考
メ タ ノ ー ル	水力発電所	1,333 MW	—	—	4.24	水力発電所の発電コストは、水電解設備の電力料相当分である 石炭コスト： 0.83円/kWh
	水電解設備	32,370 m ³ /h	10	670	2.58	
	石炭ガス化設備	2,000 t/d	2	570	2.20	
	メタノール合成設備	2,300 t/d	3	543	2.42	
	貯蔵設備（積地）	77,000 m ³	1	16	0.06	
	メタノールタンカー	49,000 m ³	2	110	0.42	
	貯蔵設備（揚地）	96,000 m ³	3	57	0.18	
	メタノール改質・分離	19,900 m ³ /h	26	1,040	4.78	
	酸素製造設備	78,900 m ³ /h	3	321	1.21	
	水素燃焼タービン	500MW	2	1,600	5.77	
	合 計	—	—	4,927	24.70	

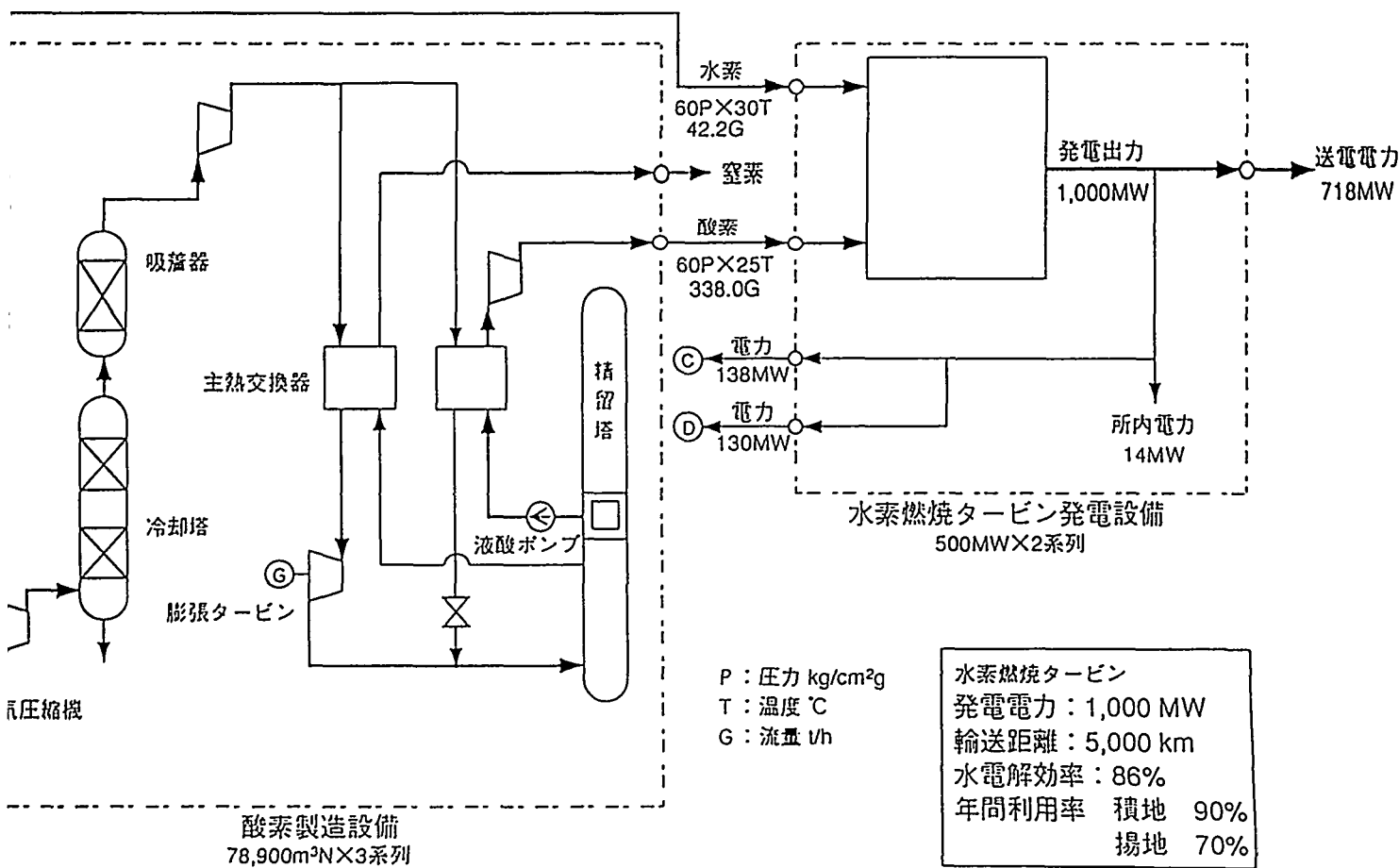
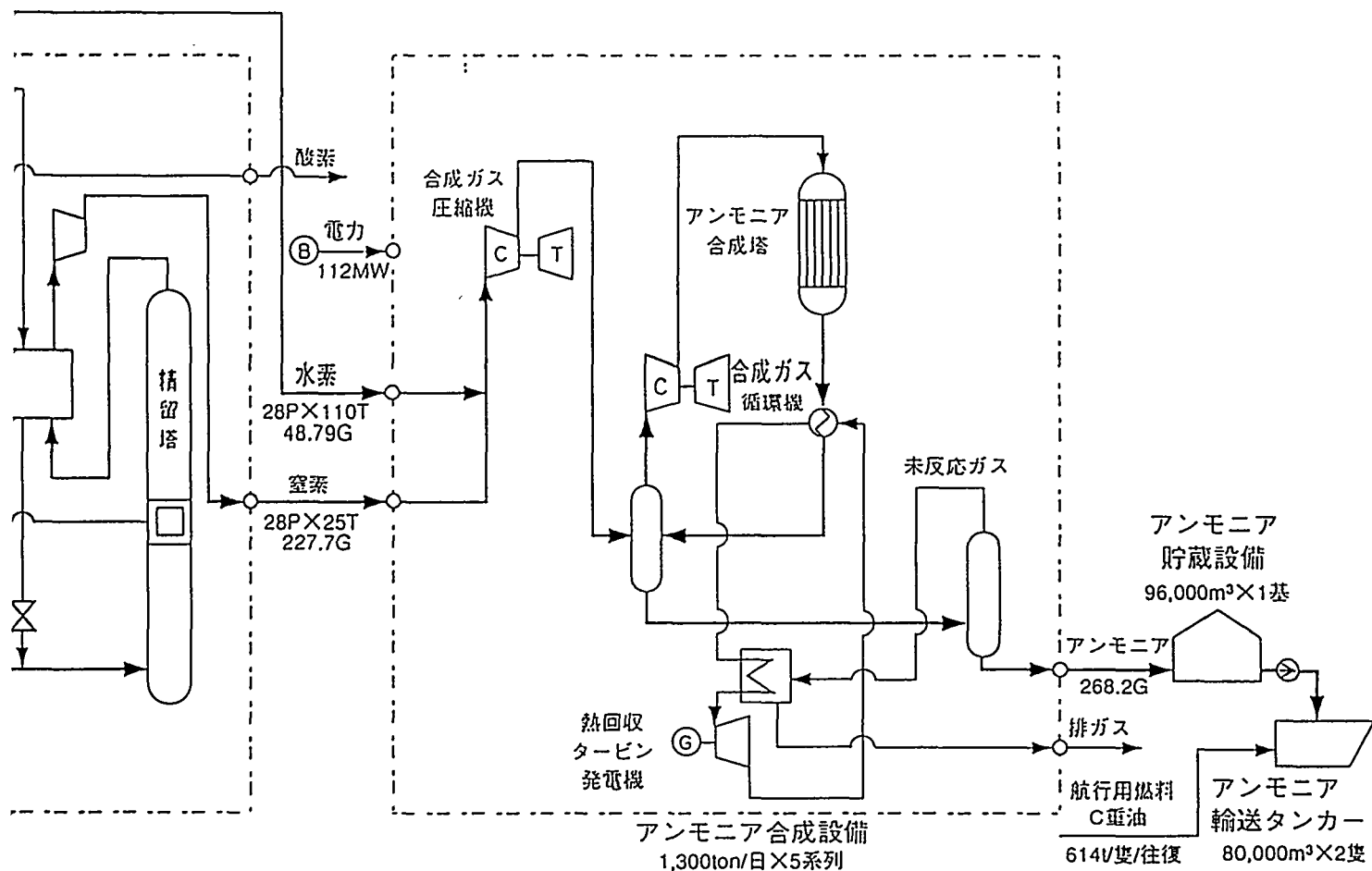
		設備容量	系列数	設備費	発電コスト	備 考
ア ン モ ニ ア	水力発電所	2,398 MW	—	—	8.60	水力発電所の発電コストは、水電解設備、窒素製造設備、アンモニア合成設備の電力料相当分である
	水電解設備	31,930 m ³ /h	17	1,139	4.95	
	窒素製造設備	61,000 m ³ /h	3	162	0.71	
	アンモニア合成設備	1,300 t/d	5	490	2.46	
	貯蔵設備（積地）	96,000 m ³	1	65	0.25	
	アンモニアタンカー	80,000 m ³	2	182	0.92	
	貯蔵設備（揚地）	74,000 m ³	5	260	0.96	
	アンモニア改質・分離	19,600 m ³ /h	26	1,222	6.11	
	酸素製造設備	78,900 m ³ /h	3	321	1.39	
	水素燃焼タービン	500MW	2	1,600	6.59	
	合 計	—	—	5,441	32.94	

〔円/kWh〕

(水素燃焼タービン発電出力：1,000MW、水力発電単価：2円/kWh、輸送距離：5,000km)

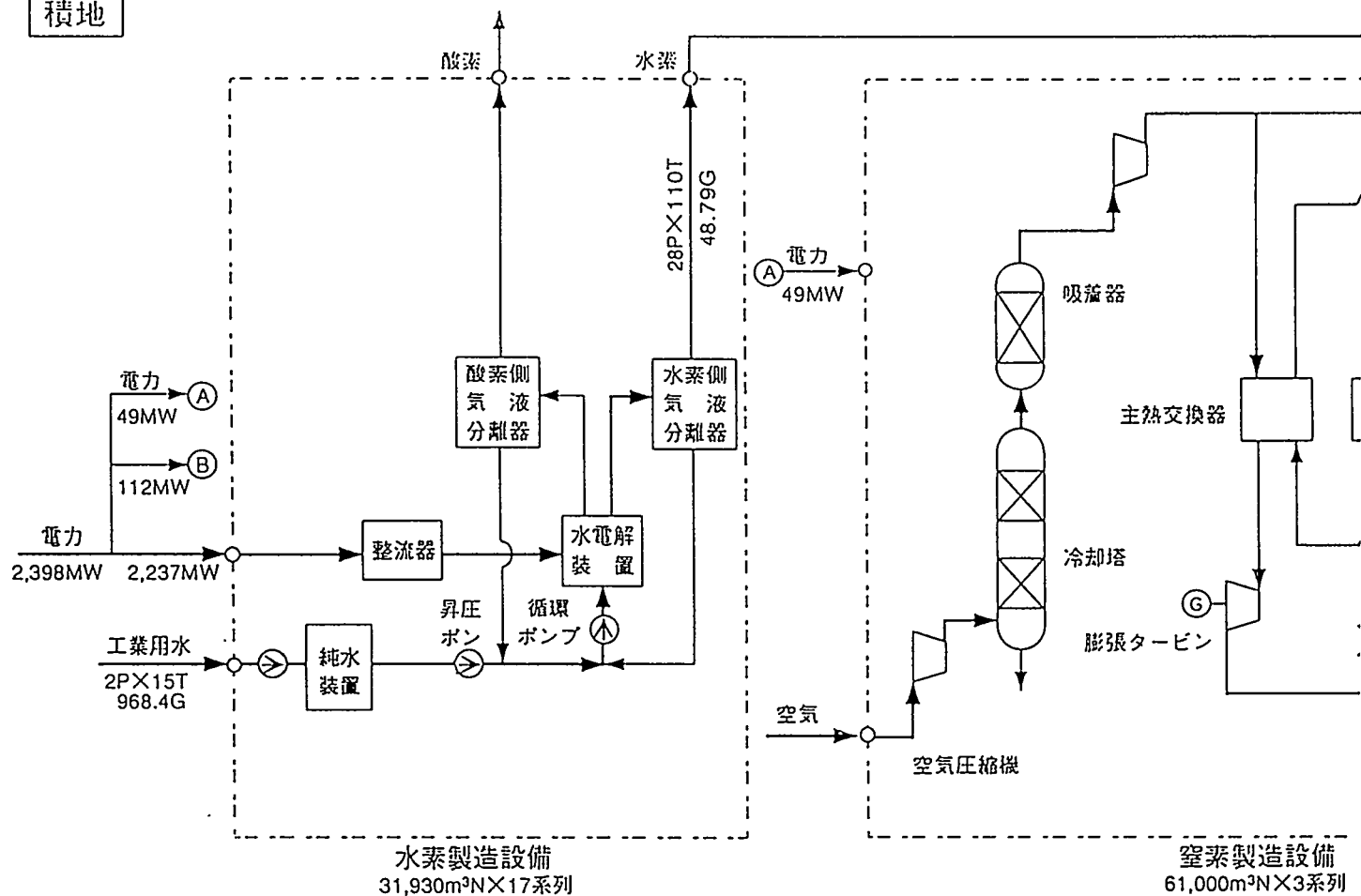






— (アンモニア) —

積地



揚地

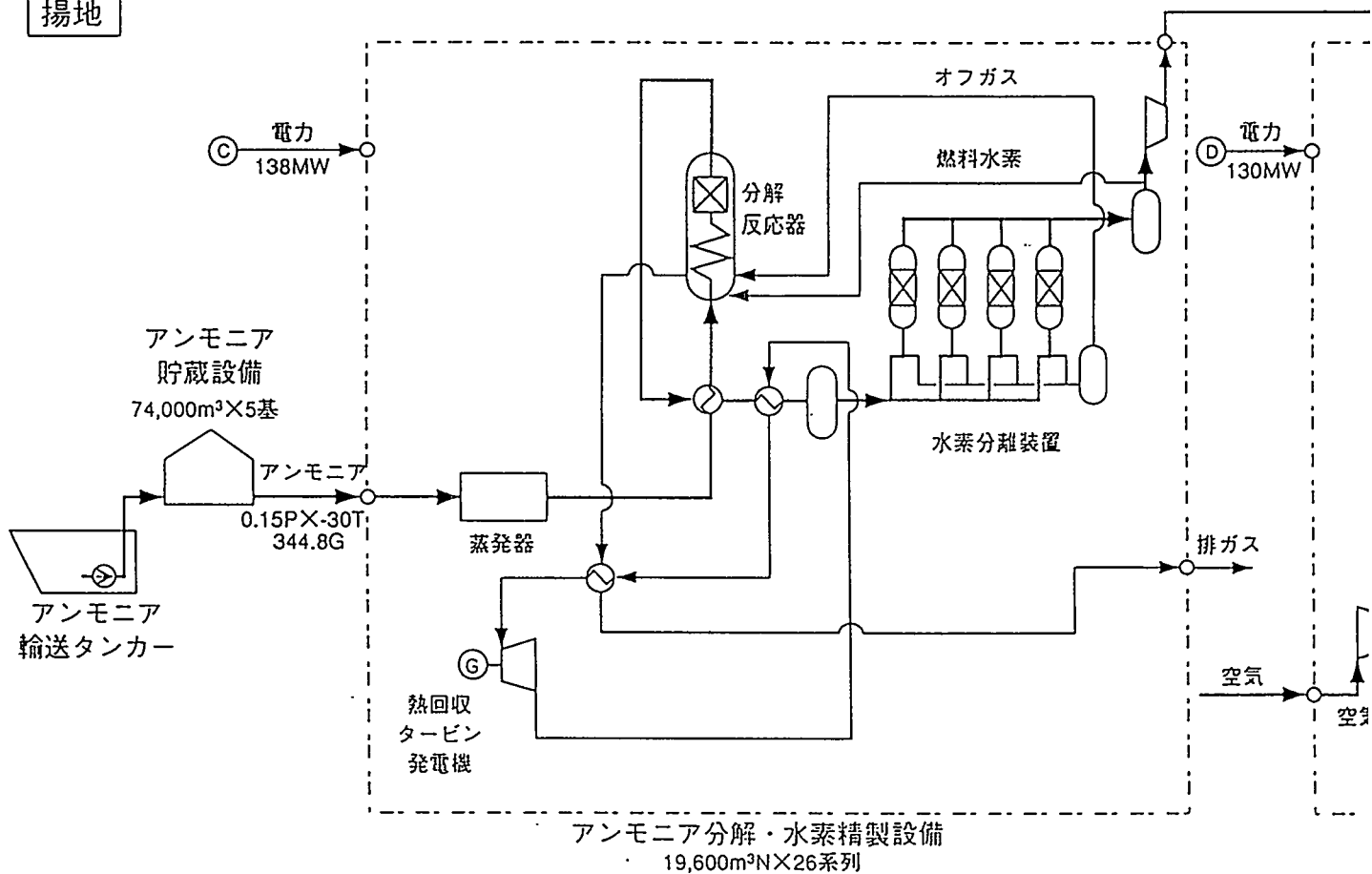


図 3.1 - 4 システムフロ-

3. 1. 2 グローバルネットワーク研究

世界規模での水素エネルギーの社会への導入効果を推定するため、現行の石油、石炭、天然ガスなどの既存エネルギーシステムに対する代替性を考慮した分析を目的として本研究を実施した。具体的には、資源量調査によりW E - N E Tの全体構想の実現性を再生可能エネルギーの資源量の面から調査するとともに、グローバルエネルギーモデルによるシュミレーション解析により水素エネルギーの導入量及び導入条件を導いた。

(1)資源量調査

水力及び太陽エネルギーの世界規模での資源量を調査した。水力についての資源賦存マップを図3.1-5に、表3.1-7に主要国別の資源量を示す。

技術的に開発可能な未開発の水力資源は世界で約12兆kWh/年あり、これは、現在の世界の総発電量（1993年：12.2兆kWh/年*）と同程度の膨大な量であることから、水力資源が本プロジェクトの成果の本格的実用化時期（2030年頃）の再生可能エネルギーの供給源として十分なことを示唆するものである。具体的には、この未開発の水力資源の半分を水素製造のための発電に供することができると仮定すると、水力発電からの水素（以下「水力水素」と言う。）の製造に利用できる総エネルギー量は15EJ（エクサジュール： $\times 10^{18}$ J）となる。

水力水素の供給元としては、未開発の水力資源を多く有する発展途上国、更に先進国においては開発余力の大きいカナダが有望であると考えられる。また、世界の計画中及び既設の水力発電所を対象に調査を行い、設備出力が1,000 MW規模以上の水力発電原価の多くは、0.02～0.05\$/kWhの範囲内にあることが判明した。図3.1-6に、発電原価と設備出力の関係を示す。

太陽エネルギーについては、世界の全砂漠地帯（図3.1-7参照）を対象に変換効率15%の太陽光発電を想定した場合、22,363EJのエネルギーが得られる。これは、現在の世界の全エネルギー需要（1993年：333EJ**）の70倍程度に相当することから太陽光発電からの水素（以下「太陽水素」と言う。）は将来の世界のエネルギー需要を十分まかなえることが判明した。

* Energy Statics Year Book, 1993

** World Energy Outlook 1996, OECDのデータを基に計算。

(2) G R E E Nモデルによる水素導入解析

将来の世界のエネルギー需給構造の中での、水素エネルギーの導入量、導入条件、導入効果（CO₂排出量削減）等をG R E E Nモデルにより解析した。

① G R E E Nモデルの概要とその改造

G R E E N (GeneRal Equilibrium ENvironmental)モデルは、経済協力開発機構(OECD)によって開発された、世界全体の経済活動を取り込んだ一般均衡型の経済モデルであり、その主要な構成は以下の通りである。G R E E Nモデルでは、各国の産業関連表や貿易統計等の統計データにより基本データが作成されており、地域区分も地勢学的な区分でなく、経済的な面で共通性のある国々をまとめた区分になっている。将来の原油価格については、1990年の約20\$/bblから2050年の50\$/bblまで上昇するとの想定がなされている。

○解析期間：1985～2050年(1985, 1990, 1995, 2000, 2005, 2010, 2030, 2050年)

○地域区分：米国(USA)、日本(JPN)、EC(EEC)、その他OECD(OOE)、エネルギー輸出国(EEC)、中国(CHN)、旧ソ連(FSU)、インド(IND)、旧東欧(EET)、動態的アジア経済圏(DAE)、ブラジル(BRA)、その他諸国(ROW)

○生産部門構成：農業、石炭、原油、天然ガス、石油製品、電力・ガス・水道、エネルギー集約的産業、その他の産業とサービス業、石炭・石油・ガス及び電力バックストップ

○消費部門構成：食料・飲料、燃料・電力、運輸・通信、その他の材・サービス

○一次要素構成：労働、資本、固定要素、農地

○エネルギー部門の構成：石炭、原油、天然ガス、石油製品、電力、石炭・石油・ガス及び電力バックストップ

○バックストップの構成：EMF12の議論を考慮して、次表のように想定されている。

GREENモデルのバックストップ°(BS)の想定

種類	実用化時期	想定技術例	想定コスト
炭索性BS	2010年	石炭液化、オイルシェール他	50\$/bbl
非炭索性BS	2010年	バイオマス他	100\$/bbl
電力BS	2010年	太陽、風力、核融合	7.5¢ /kWh

(注) EMF(Energy Modeling Forum):各国のエネルギーモデルの専門家によって設置さ

れたエネルギー研究機関であり、米国スタンフォード大学に事務局が置かれている。

このGREENモデルを使用して世界規模での水素エネルギーの導入量の解析を行うため、以下のモデル改造を実施した。

(a)モデル中のエネルギー要素として新たに水素を追加するとともに、水素源として水力水素と太陽水素を区分し、これらの供給は価格で競合するものとした。水素利用については、燃料利用と発電区分を区分して解析できるようにした。また、水力水素と太陽水素の改造GREENモデルのエネルギー構造図を図3.1-8に示す。

(b)石油や天然ガスの資源枯渇等も考慮した、より長期の解析が行えるように、解析期間を当初の2050年から2100年までに延長し、解析年を追加(2020, 2040, 2075, 2100年)した。

改造GREENモデルによって将来の世界及び日本のエネルギー需要を計算したところ、BaU(Business as Usual:自然体ケース)の場合には、2100年における世界の総エネルギー需要は、現在のほぼ5倍の1744EJとなった。これは、気候変動に関する政府間パネル(IPCC)での1990年のBaU(SA90:1682EJ)とほぼ同じであり、1992年の基本シナリオ(IS92a:1453EJ)より2割程度多めとなっている。なお、日本の2100年の総エネルギー需要は50EJとなり現在の約2.3倍となっている。(表3.1-8参照)

表3.1-8 現在及び2100年における総エネルギー需要
(単位：EJ)

現 在		2100年		
		GREEN(BaU)	IPCC-SA90	IPCC-IS92a
世界(1993)	333*	1744	1682	1453
日本(1994)	22**	50	—	—

* World Energy Outlook 1996, OECDを基に計算。

** 総合エネルギー統計, 平成7年度版(資源エネルギー庁)
における一次エネルギー総供給を基に計算。

②入力データの作成

改造GREENモデルを用いて水素の導入量を解析するため、水力水素及び太陽水素それぞれにつき、水素資源量と水素価格についての入力データを作成した。水素資源量は①の資源量調査で得られた結果から、水素価格については「全体システム概念設計」で得られた結果と既存のデータから設定した。図3.1-9に、水素価格設定の考え方を示す。

図3.1-10のGREENモデルで想定した水力水素システムは、WE-NETの全体構想の全体システムに基づいており、最終需要として自動車や都市ガス等向けの燃料需要と水素火力発電用需要を想定している。したがって、水素燃料価格については液体水素輸送の概念設計から得られたCIF価格（10.84円/Mcal：現地発電規模4,000MW、輸送距離10,000km）に需要地での貯蔵配送費（4.5¢/Mcal）を加えた価格を、水素発電価格については同じく概念設計から得られた送電端価格（31.36円/kWh）に送配電費（6,760\$/TJ）を加えた価格を入力データとしている。太陽水素については、夜間に電力が得られないという問題と、技術革新のポテンシャルを考えて、図3.1-11に示す水素吸蔵合金を利用したシステムを想定した。太陽水素の価格に大きな影響を与える太陽光発電及び水素吸蔵合金の価格（2020年）については、将来技術を考えて想定した。（太陽光発電 10円/kWh、水素吸蔵合金 1,000円/kg）

③解析結果

改造GREENモデルによる水素導入解析としては、現在の技術開発の重点である水力水素に焦点を当てた解析（水力水素導入解析）と太陽水素を含めた解析（長期シナリオ解析）を行った。

水力水素導入解析は、本プロジェクトの技術開発成果の実用化が期待される2030年前後の時期の水素導入量を予測するため、2050年までを検討期間とし、技術革新による水素価格低下による水力水素の導入傾向を、「二酸化炭素排出抑制に係る追加コスト（以下、追加コストと言う。）」の導入の有無も考慮しつつ、解析したものである。

長期シナリオ解析は、石油、天然ガス等の資源枯渇や二酸化炭素の排出による地球温暖化などの問題がより顕在化してくる長期間を対象とし、2100年

までの水素エネルギーの導入傾向を解析したものである。

解析結果は次のとおりとなった。

(a) 水力水素導入解析

(イ) 結果

水力水素の導入が進んでいくためには、水素価格低下が不可欠である。すなわち、技術革新によって年間1～2%程度の価格低下が進めば、2030年頃から2040年頃にかけて水力水素の導入が始まり、2050年で世界の総エネルギー供給の数%程度の水素エネルギーが導入される。この場合、まず、日本、米国、EUなどのエネルギー価格の高い地域で水素エネルギーの導入が進んでいく。

(ロ) 説明

図3.1-12～15に、水力水素の液体水素輸送について、価格低下率(%/年)をパラメーターに、二酸化炭素排出抑制のための追加コストの導入がない場合の世界及び日本における水素導入量及び総エネルギー供給に占める導入水素の割合を示す。

これらの図から、水素価格低下率が1.0%の場合は水素の導入がほとんど進まず、価格低下率が大きくなればその導入が顕著に進むことが理解できる。なお、水素価格の低下率2.18%のグラフは、2050年の水素需要が、ちょうど水力水素の供給限界(15EJ)に達する場合を採った解析例である。これは、毎年2.18%の水素価格の低下が実現すれば、2050年の水素需要が水力水素の供給限界に達し、世界の総エネルギー供給の約2%を水素が供給することを示している。

図3.1-16～19は、上記と同じ条件で、追加コストの導入がある場合の解析例である。世界各国で同額の追加コストがかかるとの仮定を置き、具体的な金額は2010～2020年の期間は200\$/t-C、2020年以降は231\$/t-Cとした。後者の231\$/t-Cは、火力発電所から排出される二酸化炭素の回収処分費(7,000円/t-CO₂)に相当している。この場合、毎年1.5%の価格低下が起きれば、2050年の水素需要が水力水素の供給限界に達し、世界の総エネルギー供給の約4%をまかなうとの予測結果が得られた。水素供給量が同じで割合が約2

倍になっているのは、追加コストの導入によって世界の総エネルギー需要が約半分に減少したことを意味している。

また、日本での解析結果で特徴的なことは、世界平均よりも水素エネルギーの導入割合が大きい、これは日本のエネルギー価格が高いことに起因していると考えられる。

(b) 長期シナリオ解析

(i) 結果

二酸化炭素の排出抑制の強化と太陽水素の大幅な技術革新が長期的に進むなら、2100年に世界の総エネルギー供給の1割程度の水素エネルギーが導入される可能性がある。水素エネルギーが化石エネルギーに代替したと想定すると、二酸化炭素の総排出量削減に大きく寄与したものと考えられる。このことから、長期的には、水素エネルギーは二酸化炭素の排出量削減に大きなポテンシャルを有するものと考えられる。

(ii) 説明

長期シナリオ解析の解析条件は、水素価格が2020年から、水力水素は2050年まで、太陽水素は2075年まで、それぞれ毎年2%低下するものとし、200\$/t-Cの追加コストが導入されるものと仮定した。

図3.1-20～23に、世界及び日本における長期的な水素導入量と総エネルギー供給に占める割合を示す。これらの図から、2100年の世界の水素導入量は約65EJで、世界の総エネルギー供給の約1割を占めている。なお、この水素導入量は、IPCCの第2次評価報告書のLSSシナリオにおける世界の水素導入量全体とほぼ一致した結果となった。

図3.1-24, 25に、2100年における地域別の水素導入量と総エネルギー供給に占める割合を示す。総じて、世界的に水素の導入が進展していくものと見込まれる。図3.1-26は、水力水素と太陽水素の区分を示しており、太陽水素は2050年頃から導入が進み、2100年では水力水素の3倍以上となっている。図3.1-27は、水素が化石エネルギーに代替したと想定した場合の二酸化炭素排出量の削減割合を示したものであり、2100年での削減割合は25%程度という結果となった。

表 3.1 - 7 主要な包蔵水力保有国の資源量と開発率

国 名	技術的に開発可能な 包蔵水力 (GWh/年)	既設・工事中の 包蔵水力 (GWh/年)	開発率 (%)
ア フ リ カ	1,545,108	61,702	4.0
アンゴラ	100,000	3,431	3.4
カメルーン	115,000	3,115	2.7
ザイール	774,000	6,312	0.8
中 南 米	4,395,927	517,960	11.8
アルゼンチン	172,000	32,190	18.7
ボリビア	126,000	1,638	1.3
ブラジル	1,123,218	275,381	24.5
チリ	132,433	4,306	3.3
コロンビア	520,772	31,050	6.0
エクアドル	523,840	5,806	1.1
メキシコ	159,624	25,005	15.7
ペルー	1,091,540	12,200	1.1
ベネズエラ	277,200	69,286	25.0
北 米	1,007,713	587,337	58.3
カナダ	631,713	306,387	48.5
アメリカ	376,000	280,950	74.7
ア ジ ア	4,610,639	445,207	9.7
中国	1,923,304	124,850	6.5
インド	600,000	118,397	19.7
インドネシア	709,000	7,287	1.0
日本	135,084	93,400	69.1
ラオス	210,000	3,156	1.5
ミャンマー	160,000	1,121	0.7
ネパール	144,000	707	0.5
パキスタン	120,000	21,600	18.0
トルコ	215,000	41,769	19.4
マレーシア	110,990	5,814	5.2
旧 ソ 連	2,106,000	474,760	22.5
ヨ ー ロ ッ パ	982,096	525,683	53.5
ノルウェー	200,000	112,486	56.2
スウェーデン	135,000	73,300	54.3
オ セ ア ニ ア	206,403	29,220	14.2
合 計	14,853,887	2,641,869	17.8

出典：WATER POWER HANDBOOK 1995

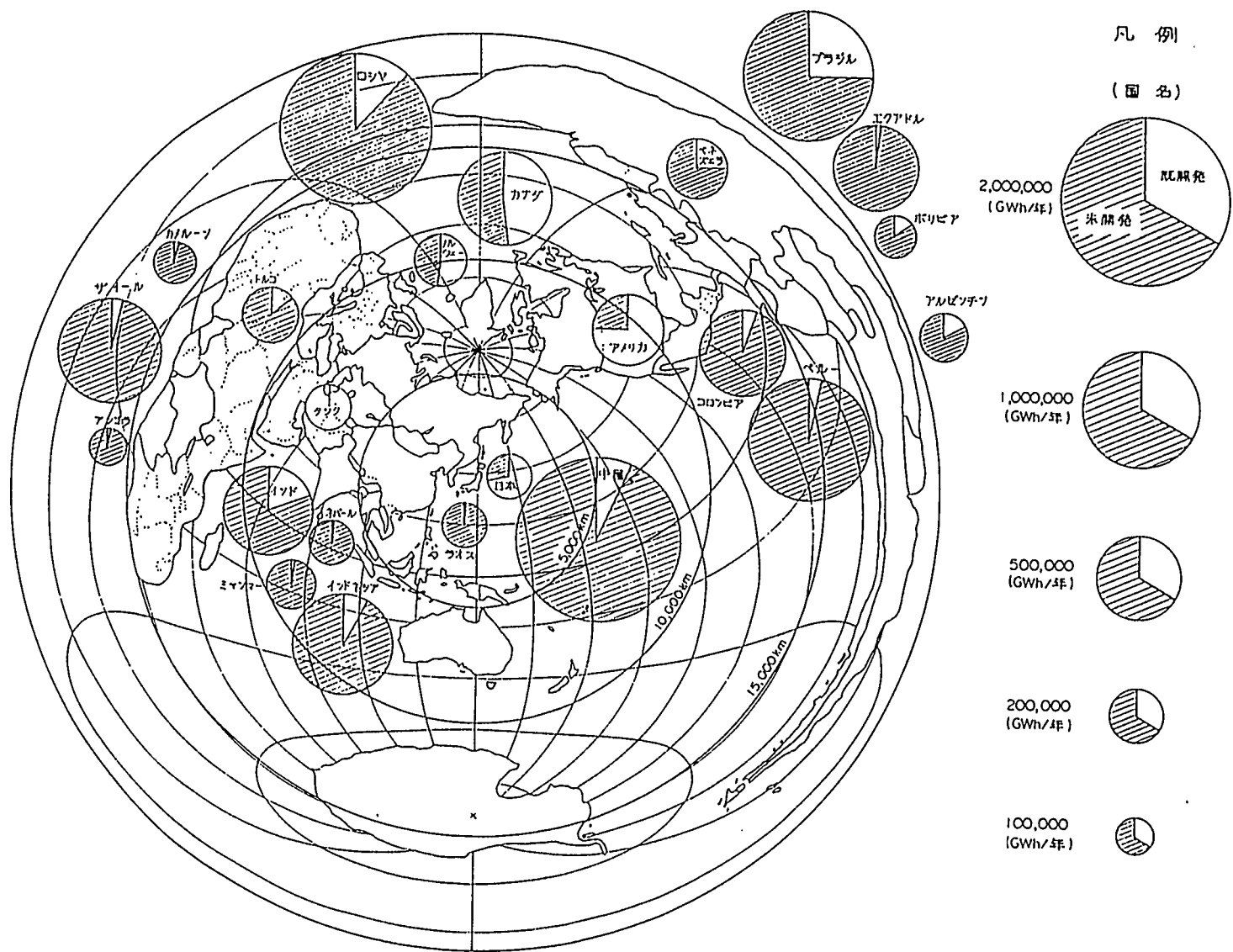


図 3.1 - 5 主要な包蔵水力保有国

発電原価(ドル/kWh)

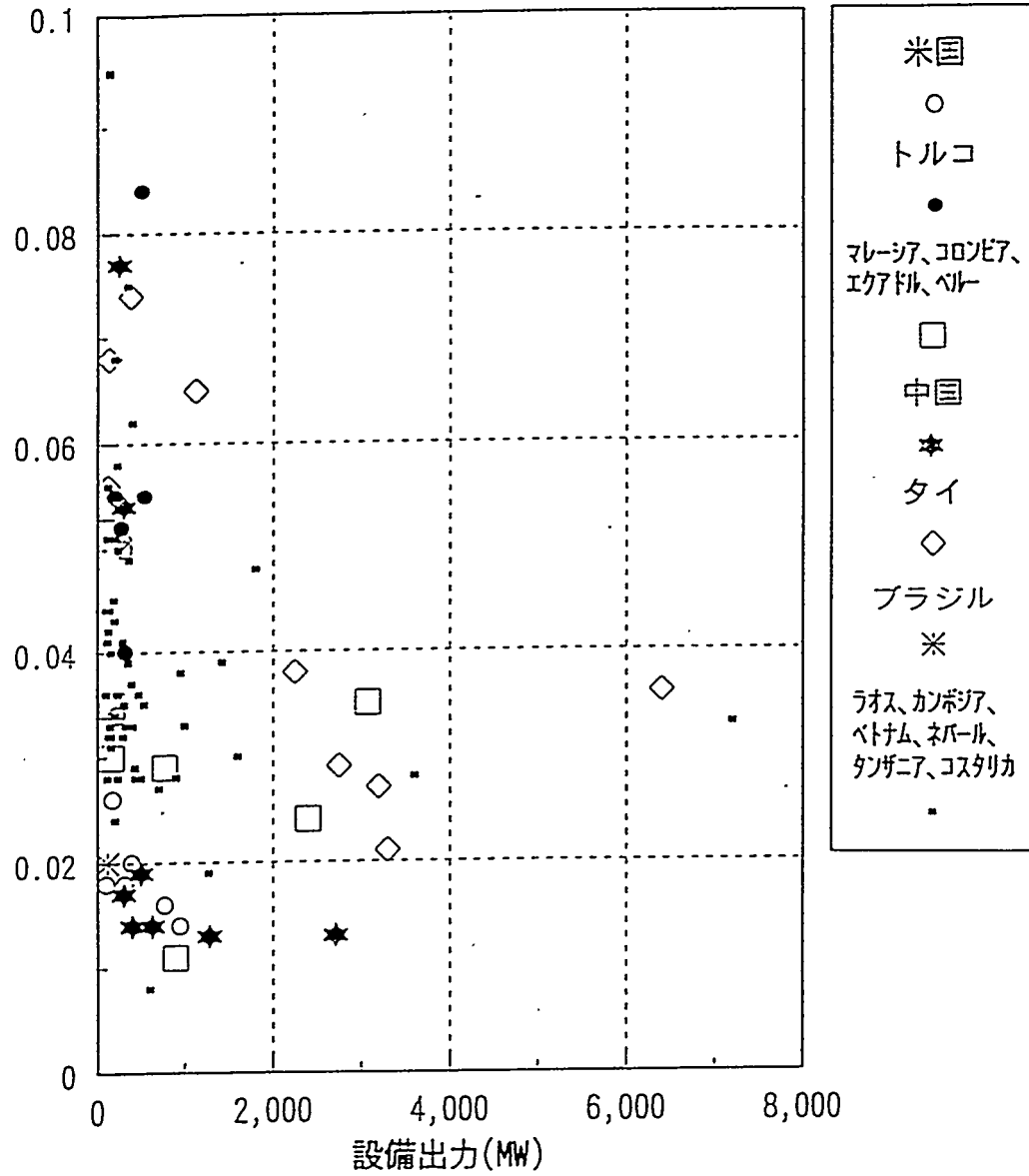


図 3.1 - 6 設備出力と発電原価

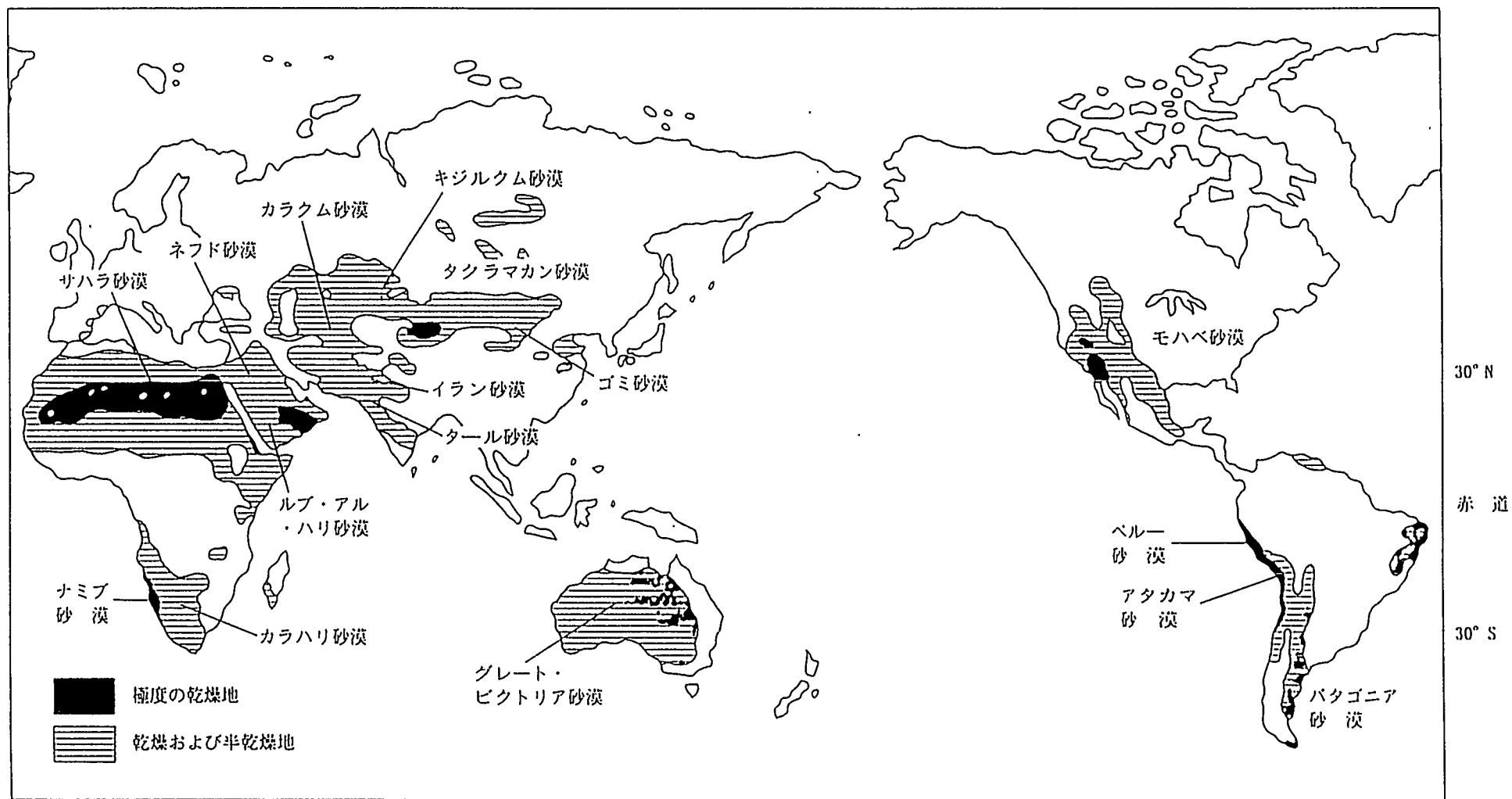
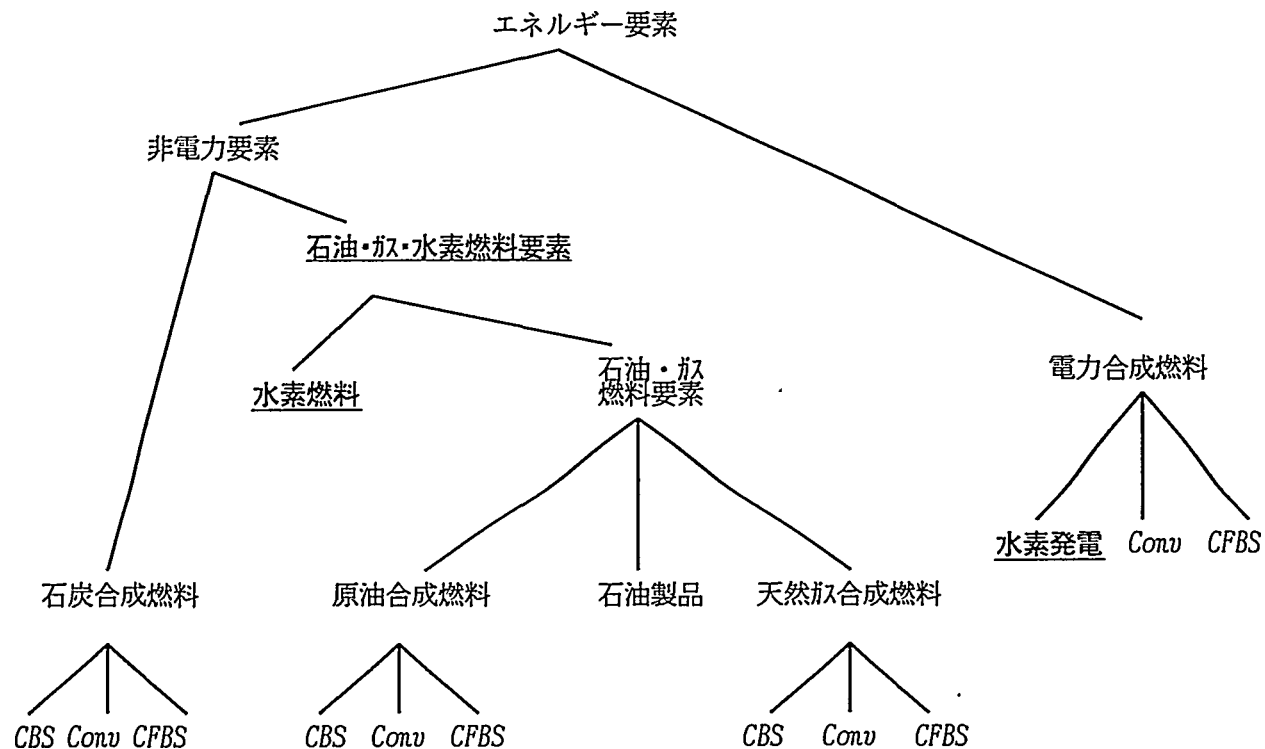


図 3.1 - 7 世界の主要な砂漠の分布 (UNESCO)

図 3.1 - 8 改造GREENモデルのエネルギー構造



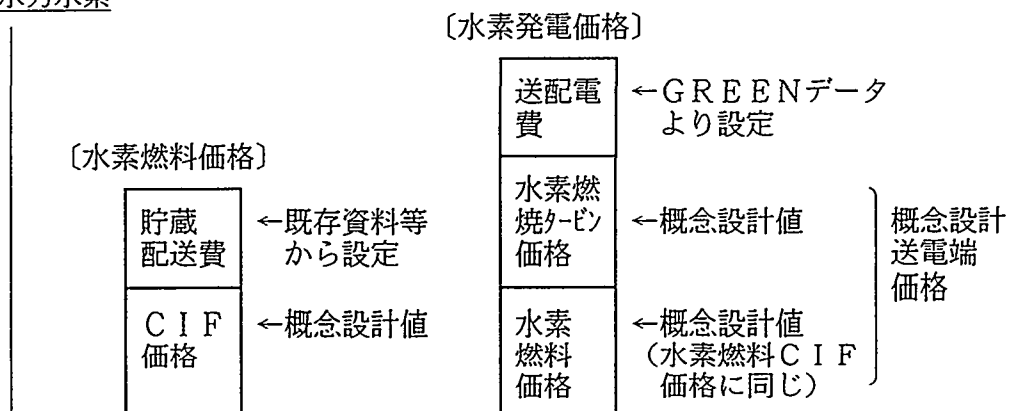
注) ○○○ は追加改造部分

Conv: 従来技術、CBS: 炭素性バックストップ、CFBS: 無炭素バックストップ
バックストップとは、従来型のエネルギー技術と価格的に競合し、2010年以降に全ての地域に、同時に、同一価格で導入され、かつ、供給可能量は無制限である既知の技術で、将来商業ベースで利用可能となるもの。下表の技術を想定している。

図 3.1 - 9 価格設定の考え方

GREENモデルは、需要者価格を入力データとすることから、下図の考え方により、水素燃料・水素発電価格を想定した。（想定技術レベルは2020年）

水力水素



太陽水素

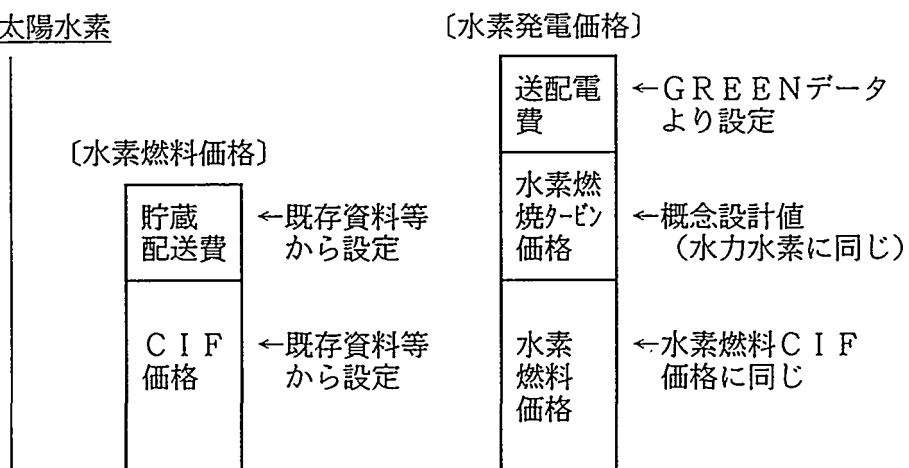


図 3.1 - 10 水力水素システム

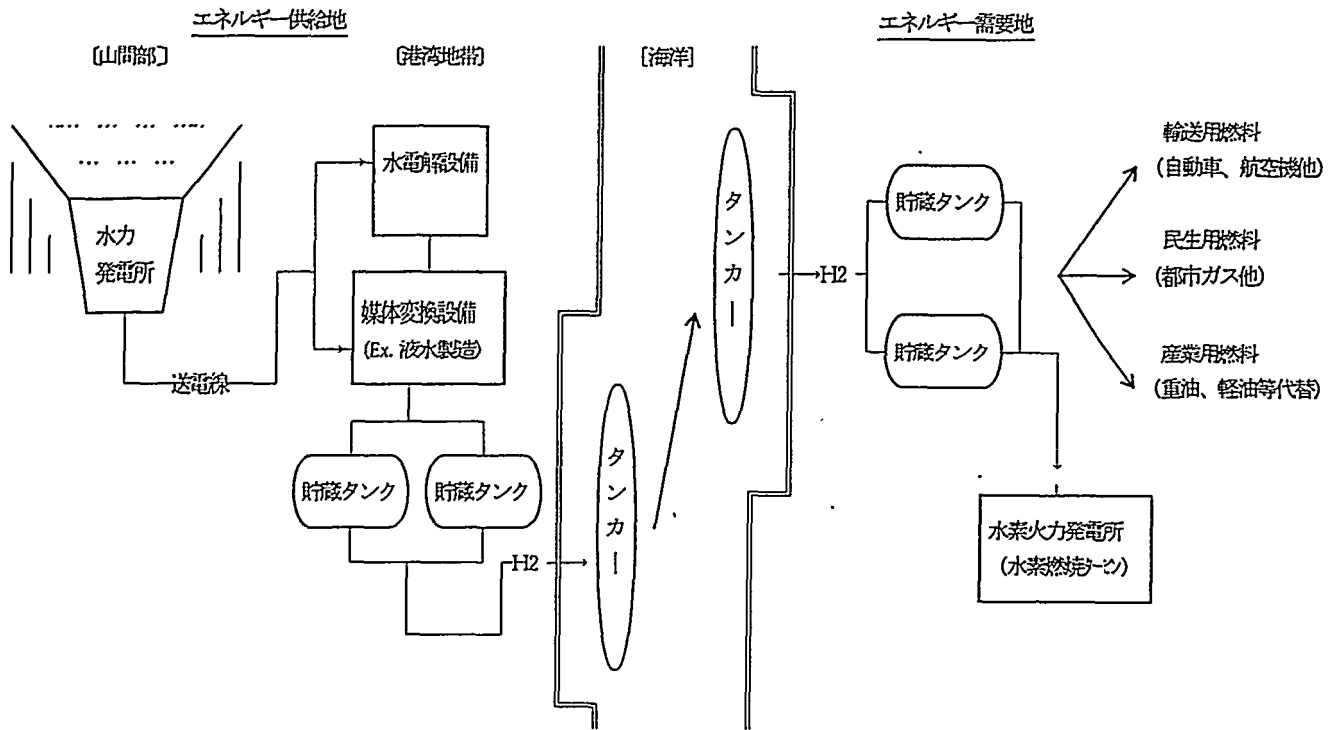
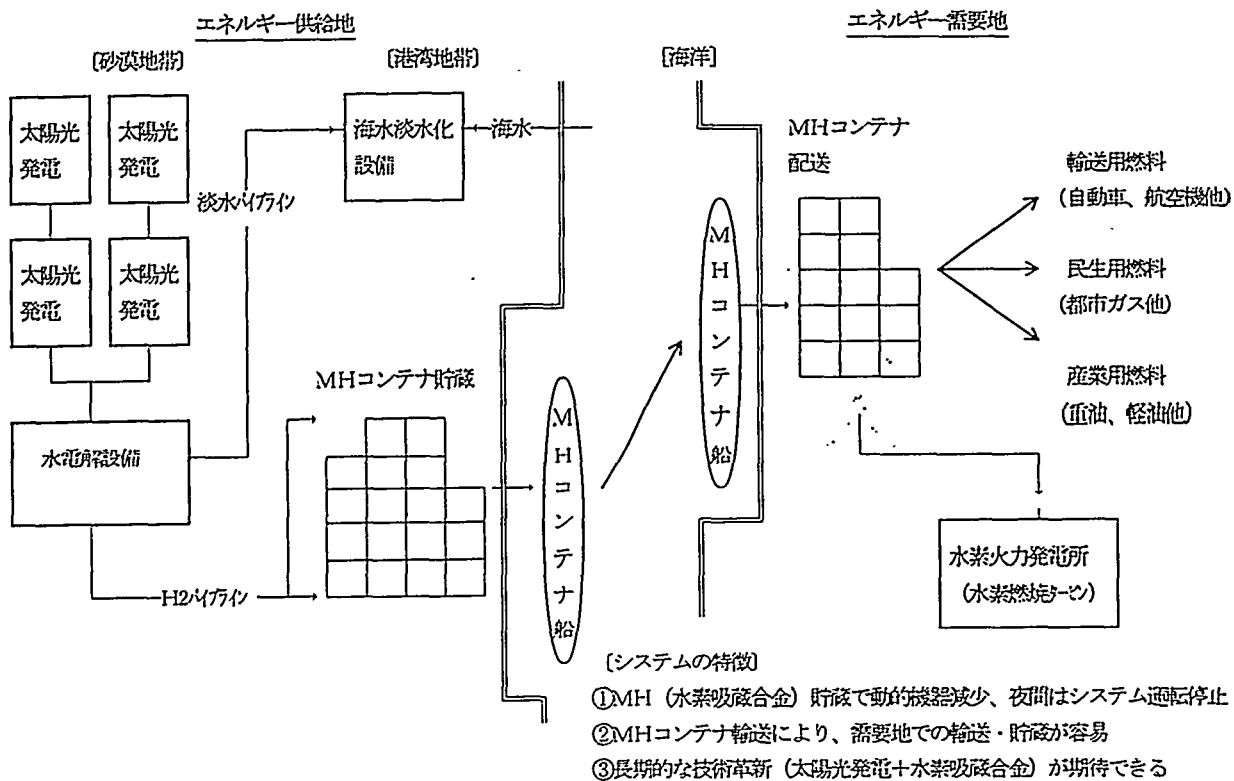


図 3.1 - 11 太陽水素システム



水素導入解析

水素価格 2020年 29,554 (\$/TJ)

2021年以降の解析

◆ 低下率 2.18 (%) ■ 低下率 1.50 (%) ▲ 低下率 1.00 (%)

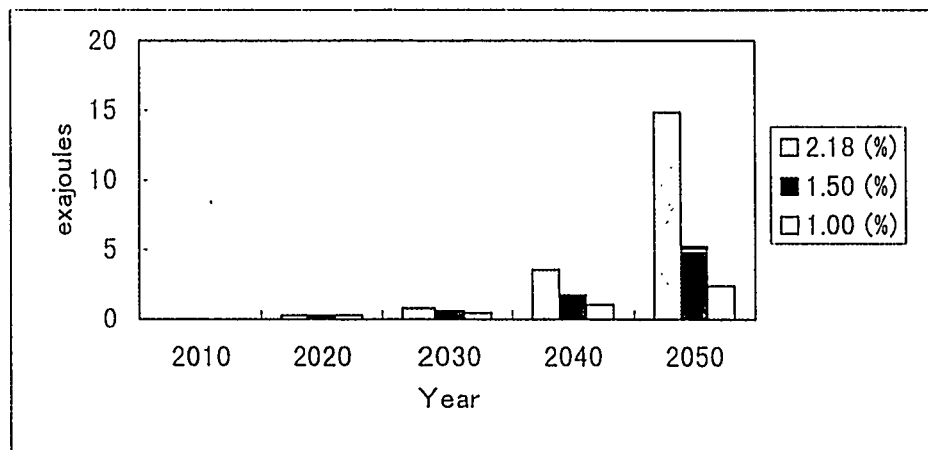


図 3.1-12 世界の水素導入量（追加コストなし）

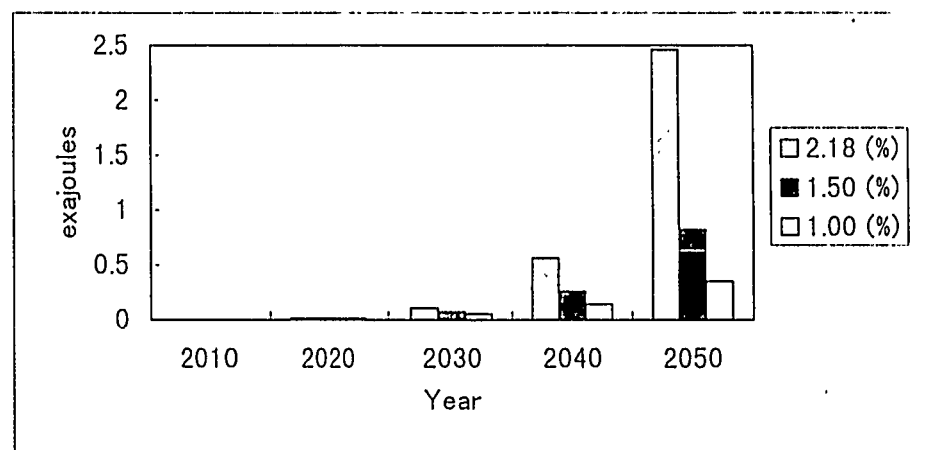


図 3.1-14 日本の水素導入量（追加コストなし）

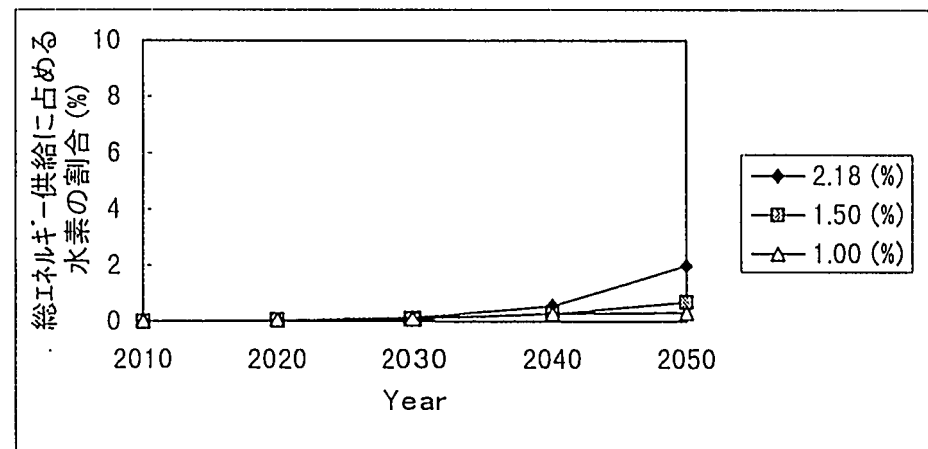


図 3.1-13 世界の水素導入割合（追加コストなし）

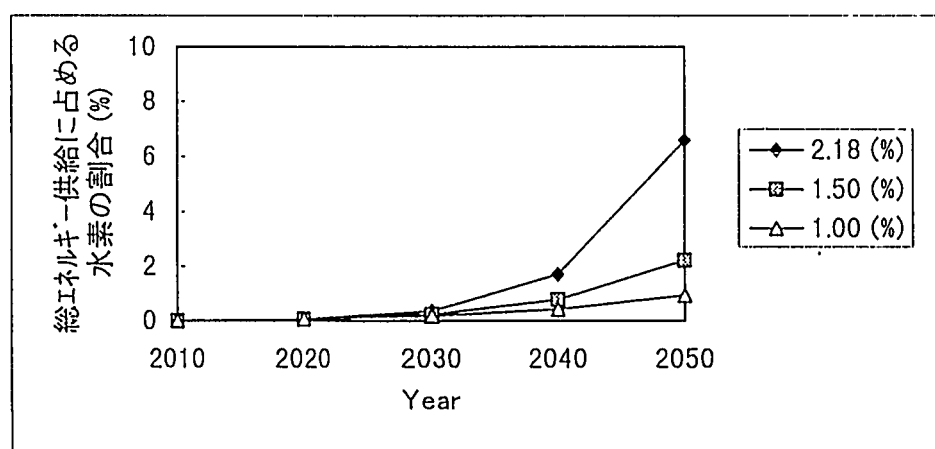


図 3.1-15 日本の水素導入割合（追加コストなし）

水素導入解析
水素価格 2020年 29,554 (\$/TJ)

2021年以降の解析

◆ 低下率 1.50 (%) ■ 低下率 1.00 (%) ▲ 低下率 0.50 (%)

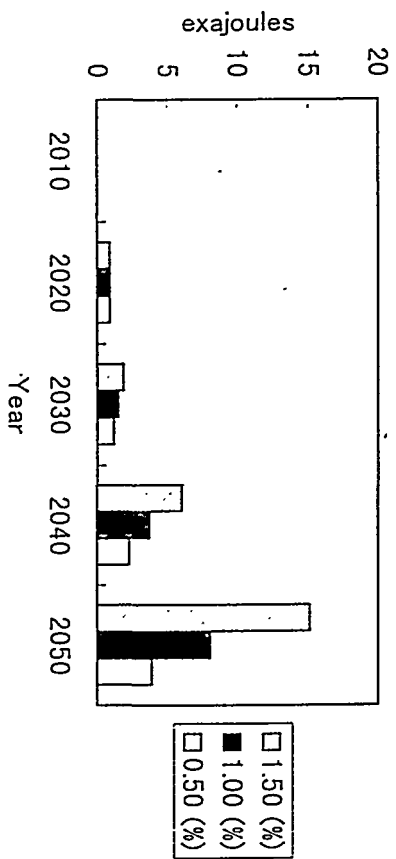


図 3.1-16 世界の水素導入量 (追加コスト231\$/t-C)

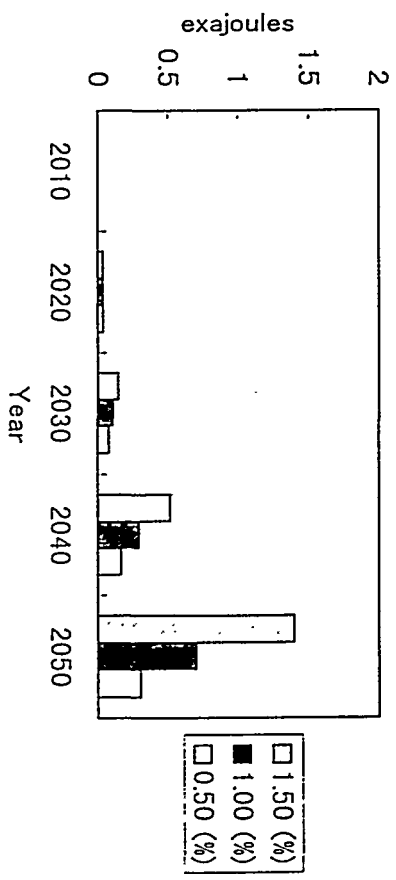


図 3.1-18 日本の水素導入量 (追加コスト231\$/t-C)

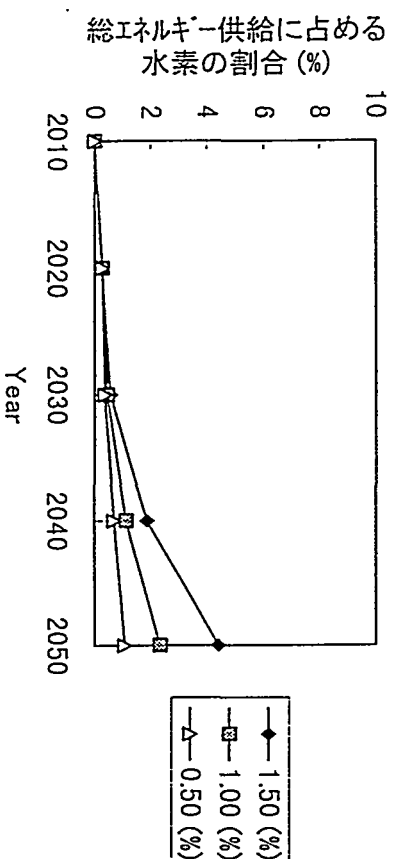


図 3.1-17 世界の水素導入割合 (追加コスト231\$/t-C)

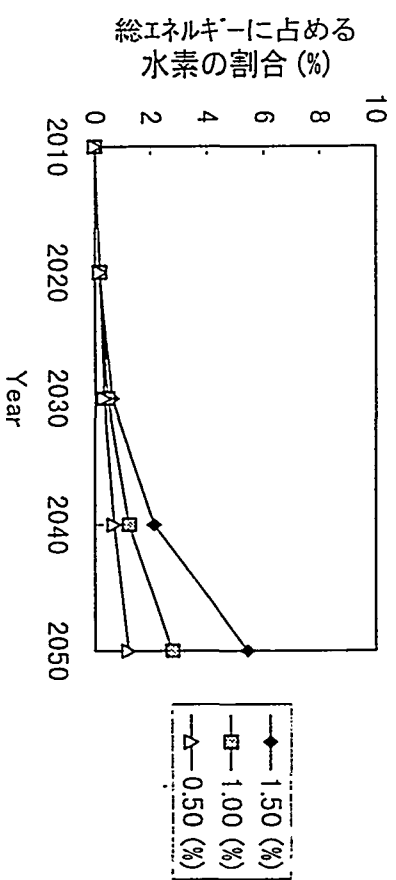


図 3.1-19 日本の水素導入割合 (追加コスト231\$/t-C)

長期シナリオ解析

水力水素価格	2020年 29,554 (\$/TJ)	2021年～2050年 価格低下率 2.00 (%)	2050年以降 一定
太陽水素価格	2020年 56,530 (\$/TJ)	2021年～2075年 価格低下率 2.00 (%)	2075年以降 一定
追加コストの設定	2010年 100 (\$/t-C)	2021年～2100年 200 (\$/t-C)	

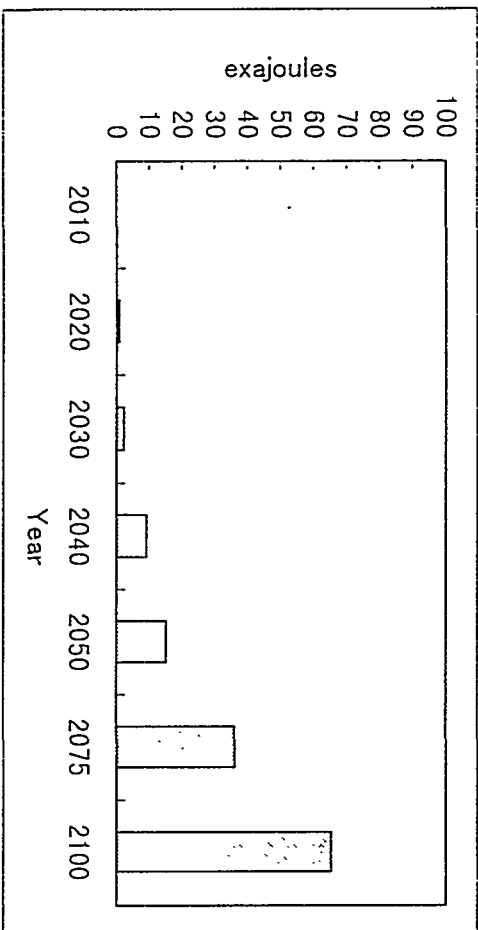


図 3.1 - 20 長期的な世界の水素導入量

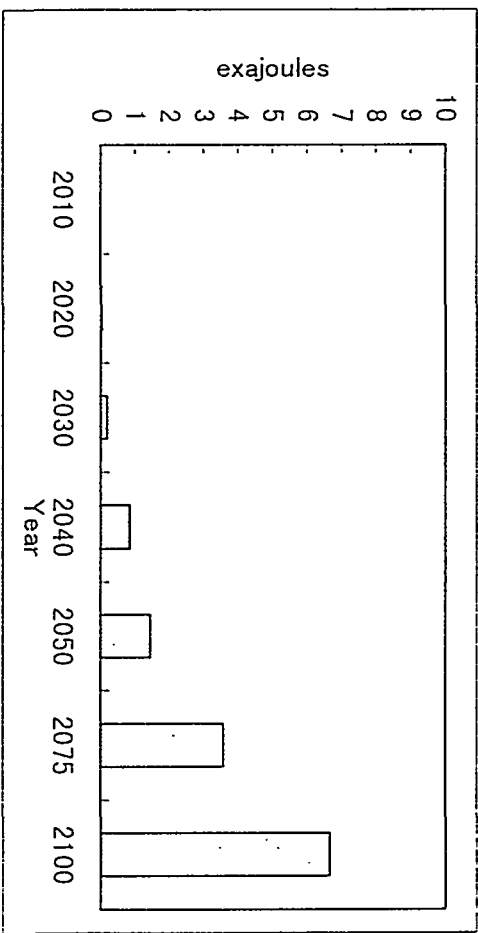


図 3.1 - 22 長期的な日本の水素導入量

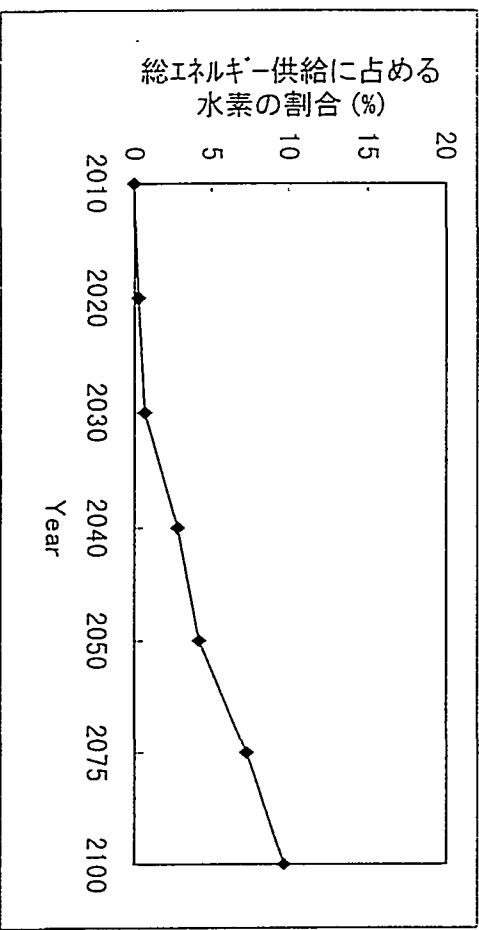


図 3.1 - 21 長期的な世界の水素導入割合

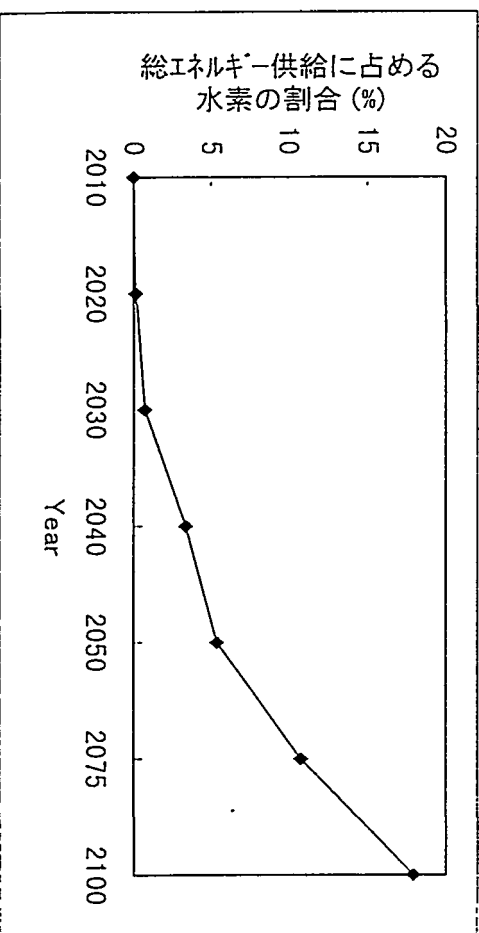
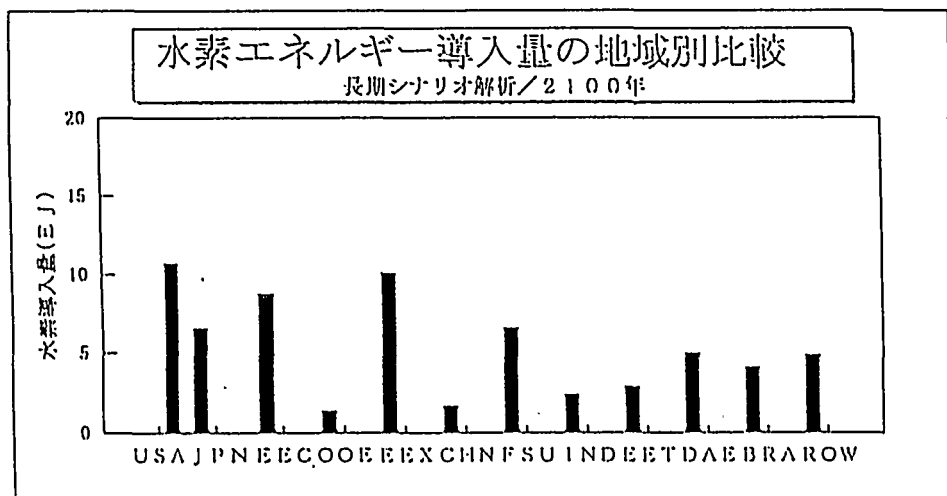


図 3.1 - 23 長期的な日本の水素導入割合

図 3.1 - 24



注) GREENの地域

USA : 米国

JPN : 日本

EEC : 欧州共同体

OOE : その他OECD

EEX : エネルギー輸出国 (アルジェリア、アンゴラ、ベニン、リビア、カメルーン、コロンビア、コンゴ、エクアドル、エジプト、ガボン、インドネシア、イラン、イラク、クウェート、リビア、マレーシア、メキシコ、ナイジェリア、オマーン、ペルー、カタール、サウジアラビア、南アフリカ、トリニダード・トバゴ、チュニジア、アラブ 連合、ベネズエラ)

CHN : 中国

FSU : 旧ソ連

IND : インド

EET : 欧州移行期諸国

(ブルガリア、チェコ・スロバキア、ハンガリー、ポーランド、ルーマニア、ユーゴスラビア)

DAE : 動態的アジア経済圏

(香港、韓国、フィリピン、シンガポール、台湾、タイ)

BRA : ブラジル

ROW : その他世界

図 3.1 - 25

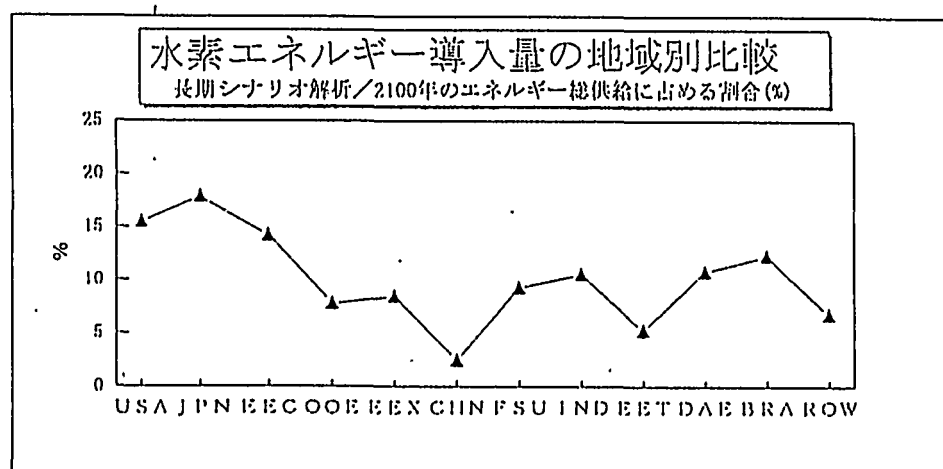


図 3.1 - 26

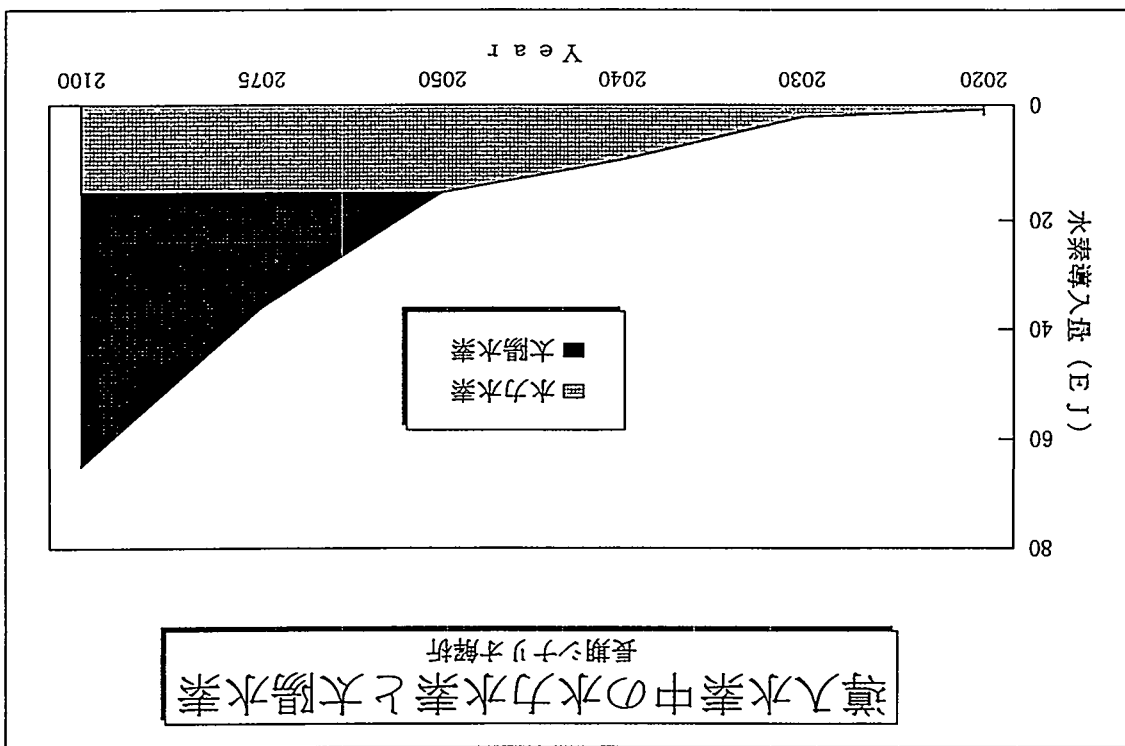
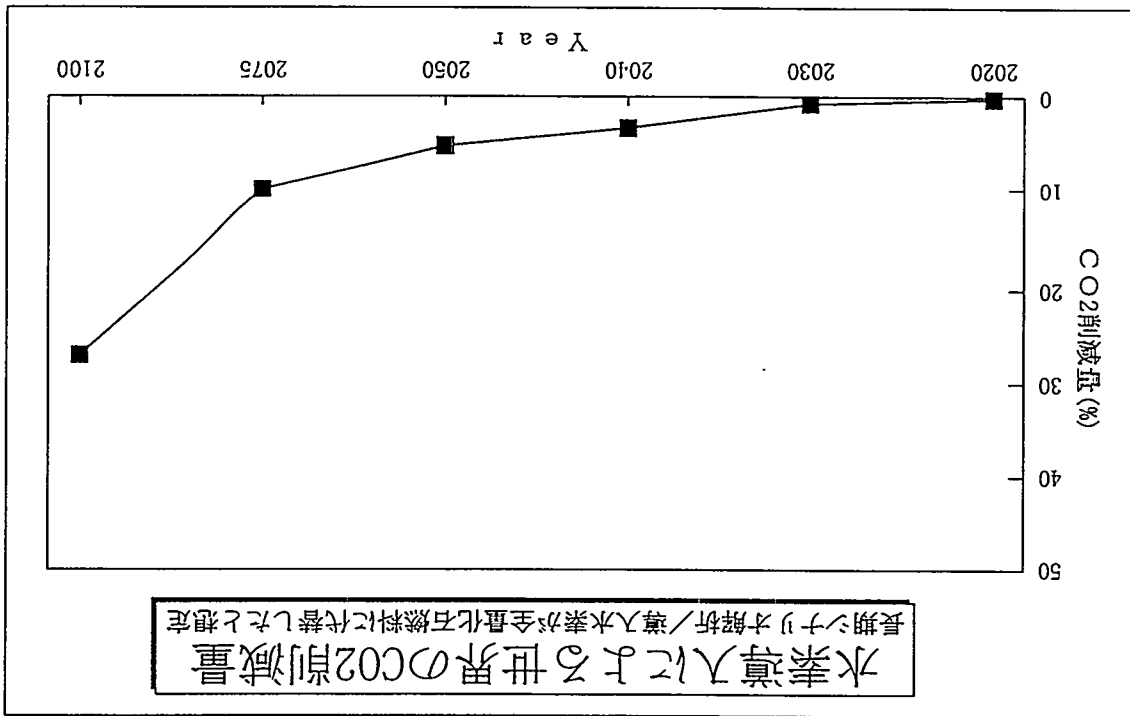


図 3.1 - 27



3. 1. 3 一国規模での予測評価

(1)調査の目的

水素エネルギーが、わが国の長期的なエネルギー需給の中で果たす役割についてシミュレーション解析を行った。すなわち、エネルギー需要を所与とし、エネルギー価格などの条件を種々変化させた場合の各分野での水素利用量等を計算することにより、どのような条件下で水素エネルギーが導入されるかを分析した。

なお、「グローバルネットワーク研究」は全世界のエネルギー需給と経済との相互影響を考慮した「エネルギー経済」モデルを用いているのに対し、本検討はわが国一国のみを対象とし、最終エネルギー需要を所与としているなど範囲を限定した解析ではあるものの、エネルギー変換・利用等の技術について、それらの間の競合を含めた検討を行っている点に特徴がある。

(2)利用したモデル

本検討には、国際エネルギー機関(IEA)における国際協力による米国ブルックヘブン国立研究所などで開発されたMARKAL (Market Allocation) モデルを用いた。(図3.1-28参照)

本モデルは、エネルギー需要や一次エネルギー供給量の上限などに関わる入力条件のもとで、費用(環境税などを考慮することも可能)を最小とするエネルギーフローを計算する。その際には、各種のエネルギー技術(例:石炭火力発電)の建設費、耐用年数等を入力とし、エネルギー技術間の競合関係を考慮している。なお本検討に当たっては、検討年次の延長、水素関連技術の組み込み等のモデル改造を実施した。(表3.1-9参照)

(3)前提条件

IEA/ETSAP(Energy Technology Systems Analysis Programme)の検討条件を、オリジナルの2030年から2100年頃までに延長し、わが国のエネルギー・水素需給を検討した。また水素価格、化石燃料価格、原子力容量、二酸化炭素排出抑制方策(排出量抑制、追加コスト)などをパラメータとした感度解析を実施し

た。基本的な想定条件は次の通りである。

- ① 現在から2100年頃までを検討対象。
- ② 国内エネルギー需要の伸びは年率0.6%程度。
- ③ 石油及びLNGの価格上昇率は年率1.2%程度、石炭の価格上昇率は0.9%程度。（図3.1-29参照）
- ④ 2020年の輸入水素の価格を29.6\$/GJ（約14円/Mcal）とし、それ以降の価格低下率を変化。なお、この価格(29.6\$/GJ)は、「グローバルネットワーク研究」と同じものとした。
- ⑤ 2020年以降に輸入水素が導入されるものとし、それ以降に導入可能量が増大するものとした。また、2100年頃の一次エネルギー全体に対する輸入水素の割合の上限値は15%程度と仮定した。
- ⑥ エネルギーの供給から需要に至る流れを検討するために、種々のエネルギー転換・利用技術等を想定している。水素に関する技術を図3.1-30に示す。
なお、検討に当たっては、水素価格、化石燃料価格、二酸化炭素排出抑制方策（排出量抑制、追加コスト）等をパラメータとした感度解析を実施した。
（表3.1-10参照）

(4) 検討結果

計算結果の一例として、ケース1（表3.1-10参照）に対し、水素価格及び二酸化炭素排出抑制値を変化させた場合の計算結果を図3.1-31～33に、ケース2に対し、水素価格及び二酸化炭素排出抑制に係る追加コストを変化させた場合の計算結果を図3.1-34に示す。また化石燃料価格を変化させた場合（ケース3）に対する計算結果を図3.1-35に示す。なお、参考のために、ある想定条件のもとでの一次エネルギー需給を図3.1-36に示した。

- ① 輸入水素が国内で広く利用されるためには、水素価格を低減することが不可欠である（図3.1-31,33）。2020年以降の水素価格が全く低下しないと想定した場合、石油価格等に年率1%弱程度の上昇を想定しても、輸入水素は2100年に至るまでほとんど導入されない。ただし、2020年以降、水素価格が年率

2 %程度で低下する場合は、水素輸入量は増大する。

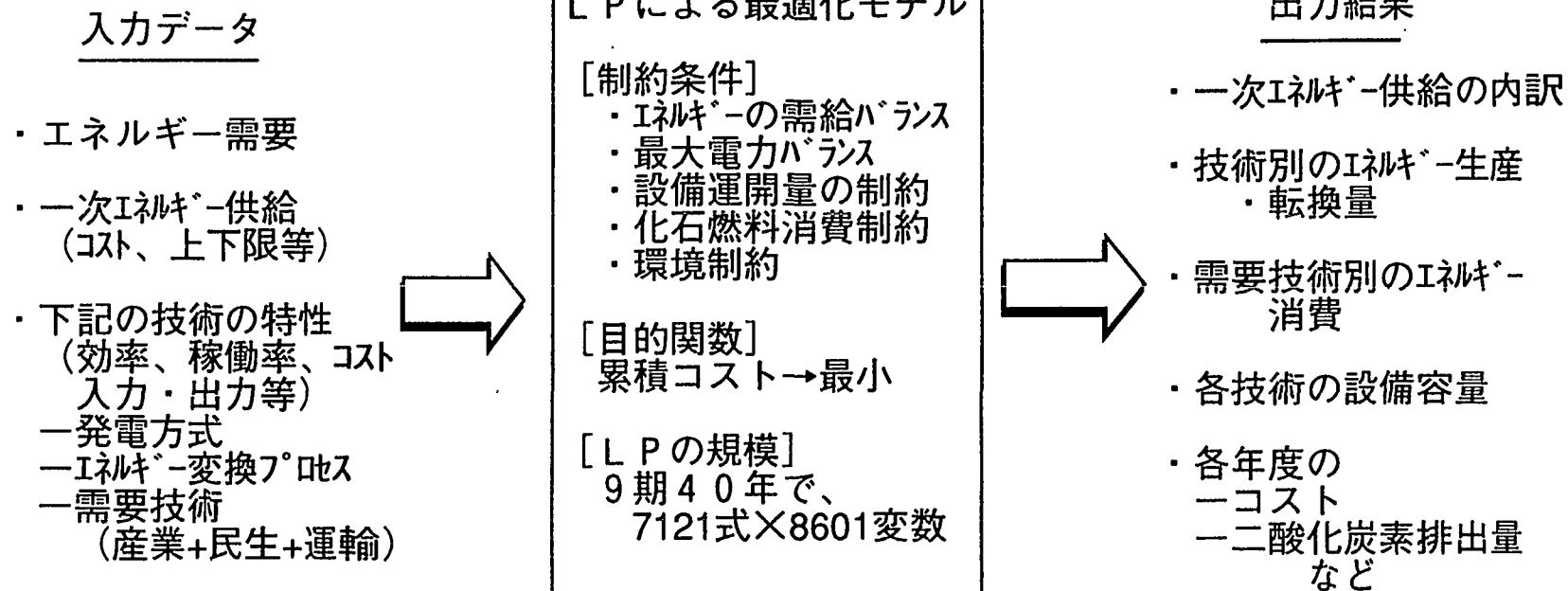
②水素輸入量を、その価格ほどではないが、大きく左右する条件に二酸化炭素排出抑制方策の今後の推移がある（図3.1-32～33）。例えば、二酸化炭素排出量が抑制されとした場合、水素価格が年率1 %程度しか低下しない場合であっても水素が輸入される。また、二酸化炭素排出抑制に係る追加コスト等が課される場合、水素の化石燃料に対する価格競争力が向上し水素が輸入される。（図3.1-34）

③図3.3-35は化石燃料価格の上昇率の感度分析を行った結果である。化石燃料価格の上昇率を年率1.6 %程度と想定した場合、水素価格の低下率が年率1 %であっても、相当量の水素が輸入されることが判明した。

(5) 今後の予定

平成9～10年度に下記の研究を実施する予定である。

- ①グローバルネットワーク研究と整合性を図った条件の下での検討を行う。すなわち、水素価格等についてはこれまでも協調を図ってきたが、他の燃料価格等についてもグローバルネットワーク研究の結果を反映する。
- ②水素に関連するエネルギー転換技術や利用技術でどのような技術が利用されるかについて、それらの設備コストなどをパラメータとした検討を行う。



(注) MARKAL: **M**arket **A**llocation
国際エネルギー機関 (IEA) でエネルギー技術開発戦略を
検討するために、国際協力のもとに開発したエネルギーモデル

図 3.1 - 28 MARKALモデルの概要

表 3.1 - 9 モデルの改造点

必要な改良	具体的な内容
水素関連技術の組み込み等	・ 水素燃焼タービンなどの発電技術の組み込み ・ 海外からの水素輸入の組み込み ・ 発電以外の水素利用技術（見直し）
計算年度断面の見直しとデータの変更	・ 「グローバルネットワーク研究」との協調 ――計算期間の2100年までの延長 ・ 年度間隔の変更に伴うデータの見直し
感度解析実施のための準備	・ レポートゼネレータの整備など動作環境の整備 （主要な結果の抽出とわかりやすい出力） ・ 水素の解析の面からは重要度の低い部分の抽出・整理

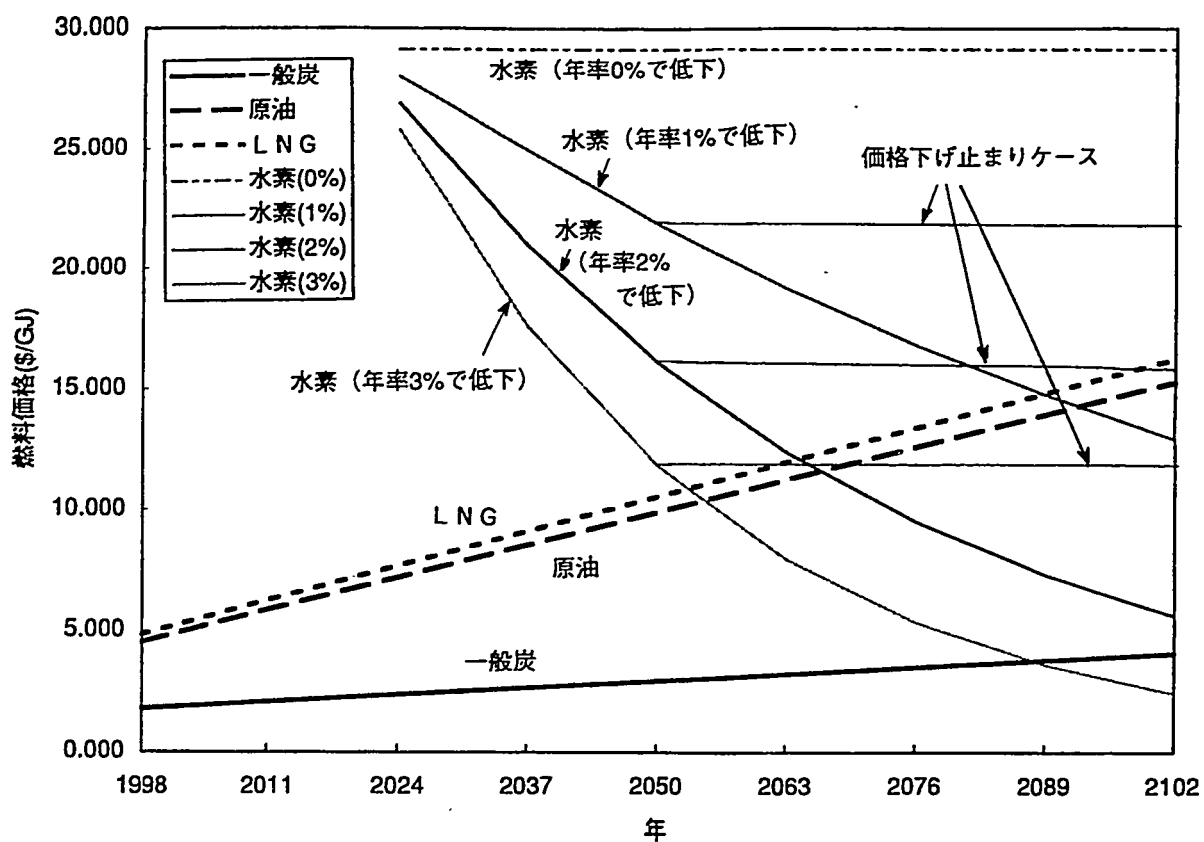


図 3.1 - 29 想定した燃料価格（基本的な想定条件）

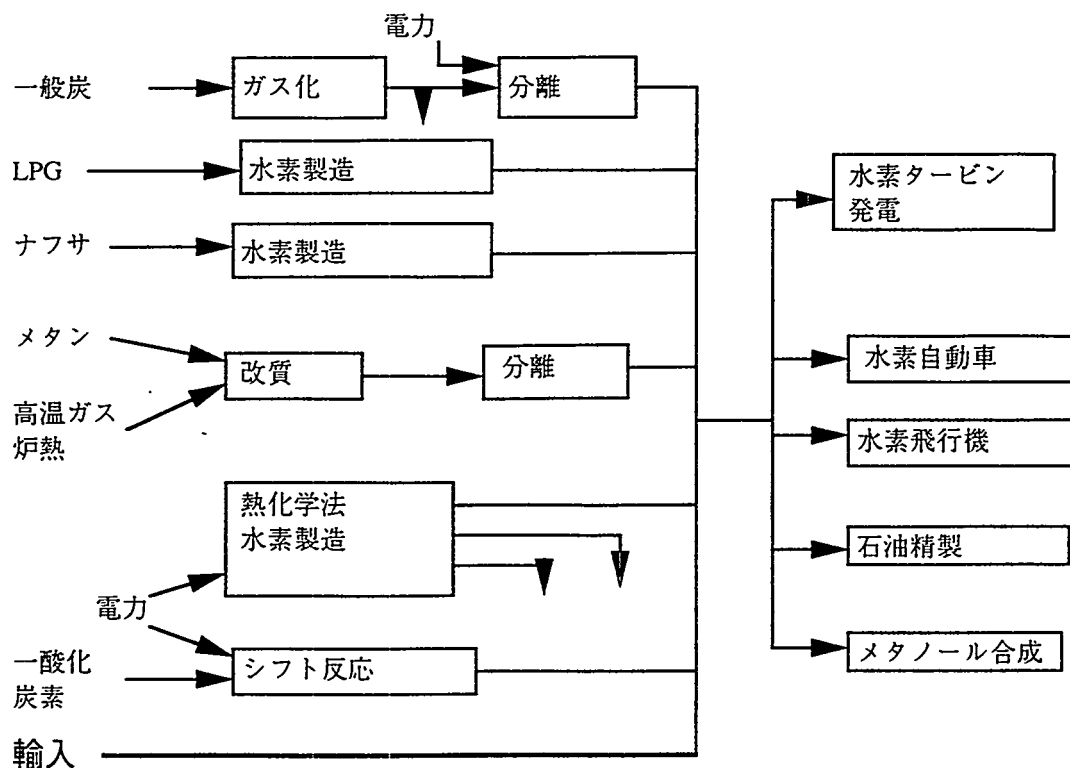


図3.1-30 想定した水素関連技術のそのつながり

表 3.1 - 10 主要な感度解析ケースの一覧

ケース	輸入水素価格	化石燃料価格	二酸化炭素排出抑制方策	検討の狙い
1	・ 2020年で \$29.6/GJ ・ 2020年からの低下を考える。 [低下率] 0～3%/年 ・ 2050年以降、価格が下げ止まる場合も想定。	標準条件 (図3.1-29)	2020年以降の二酸化炭素排出量を1990年値の ・ 100% ・ 90% ・ 80% ・ 制約無し	水素輸入量、コスト、二酸化炭素排出量の関係検討
2		石油価格の上昇率は平均すれば年1.2%/程度	2010年以降の追加コスト ・ \$200/C-t ・ 毎年\$10/C-tで増加	水素輸入量、コスト、追加コストの関係検討
3		・ 2102年の価格は標準の1.5倍、1998年の価格は標準の1倍。他は内挿。 ・ 石油価格の上昇率は平均すれば年1.6%/程度	2020年以降の二酸化炭素排出量を1990年値の ・ 100% ・ 90% ・ 80% ・ 制約無し	化石燃料価格変化の感度解析

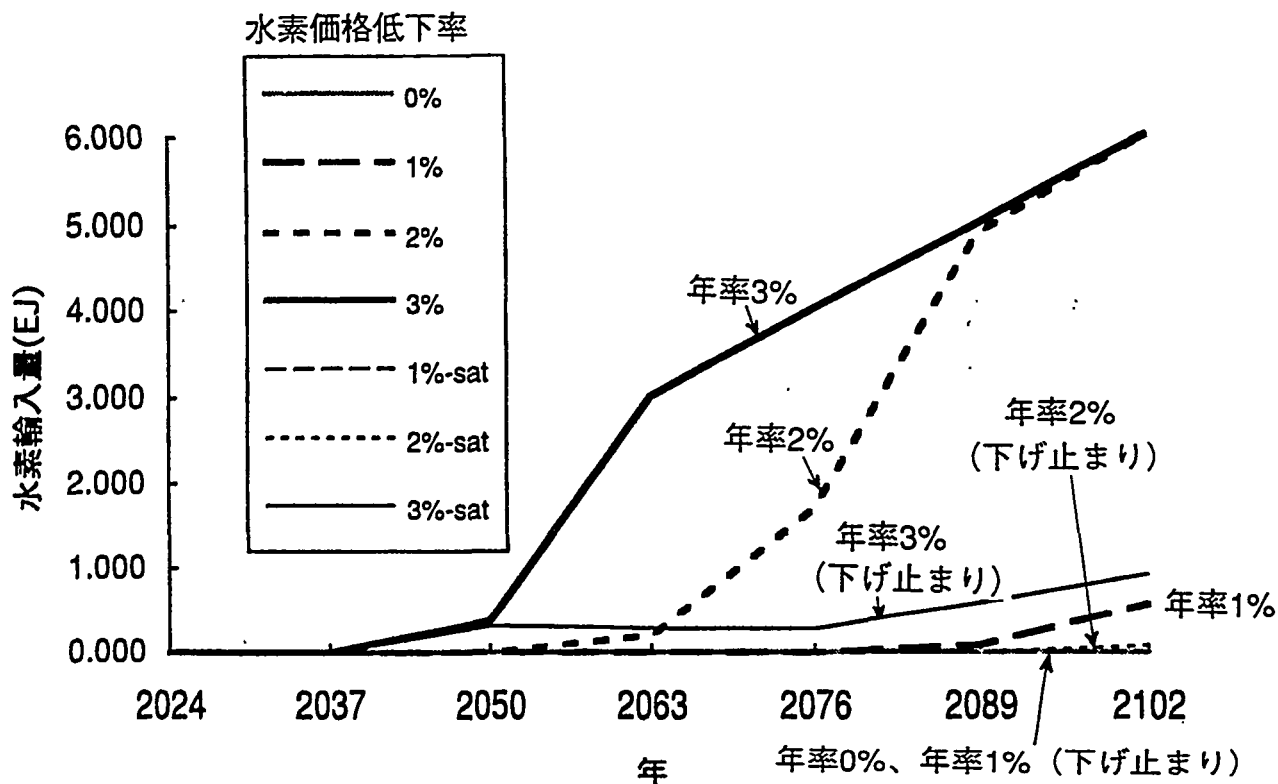


図3.1-31 輸入水素価格の低下と水素輸入量
(ケース1、CO₂排出量制約：1990年の90%)

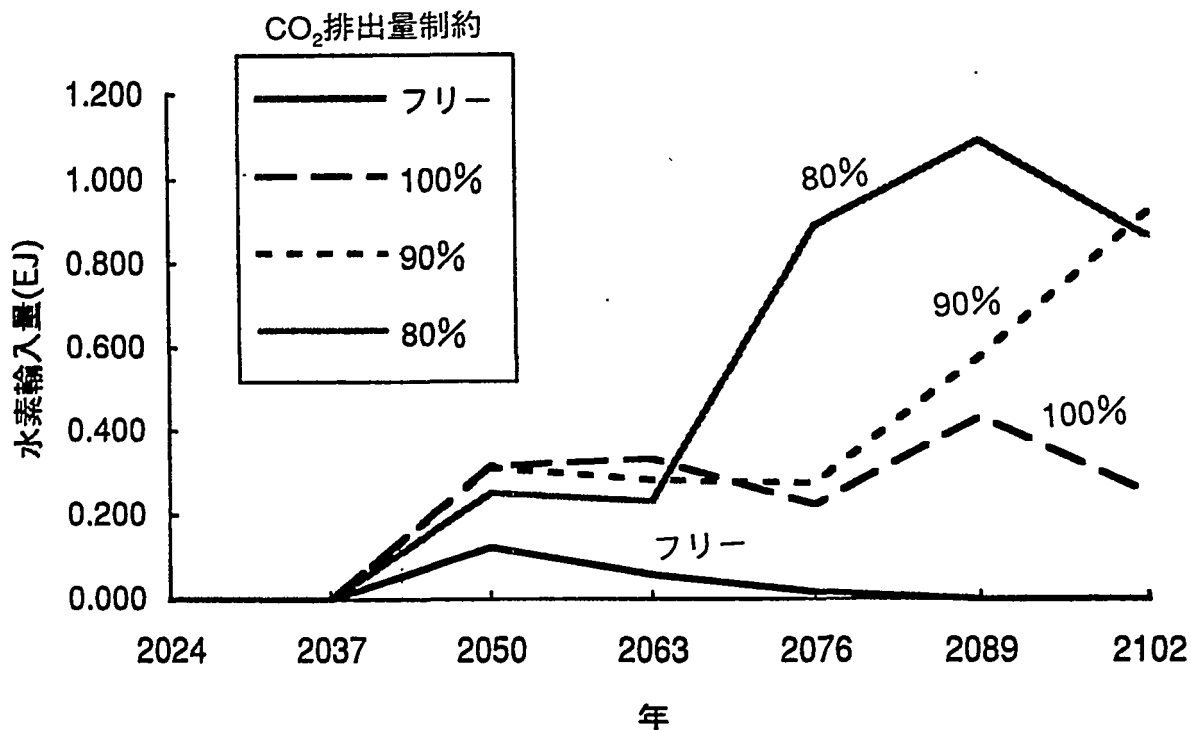


図3.1-32 CO₂排出量制約と水素輸入量
(ケース1、輸入水素価格：2050年まで△3%/年)

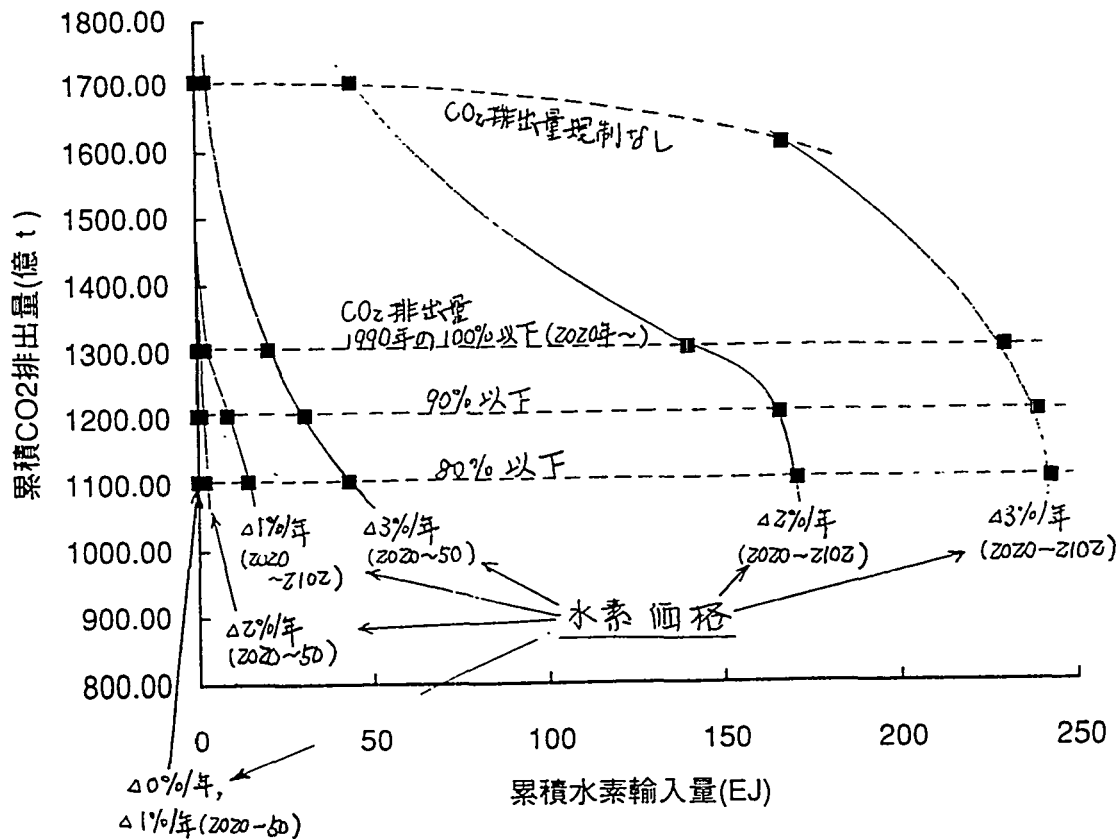


図3.1-33 CO₂排出量抑制時（ケース1）のCO₂排出量と水素輸入量の関係

- (注) 1. CO₂排出量抑制量と水素価格をパラメータ
2. 縦軸、横軸はともに1985~2102年の累積値

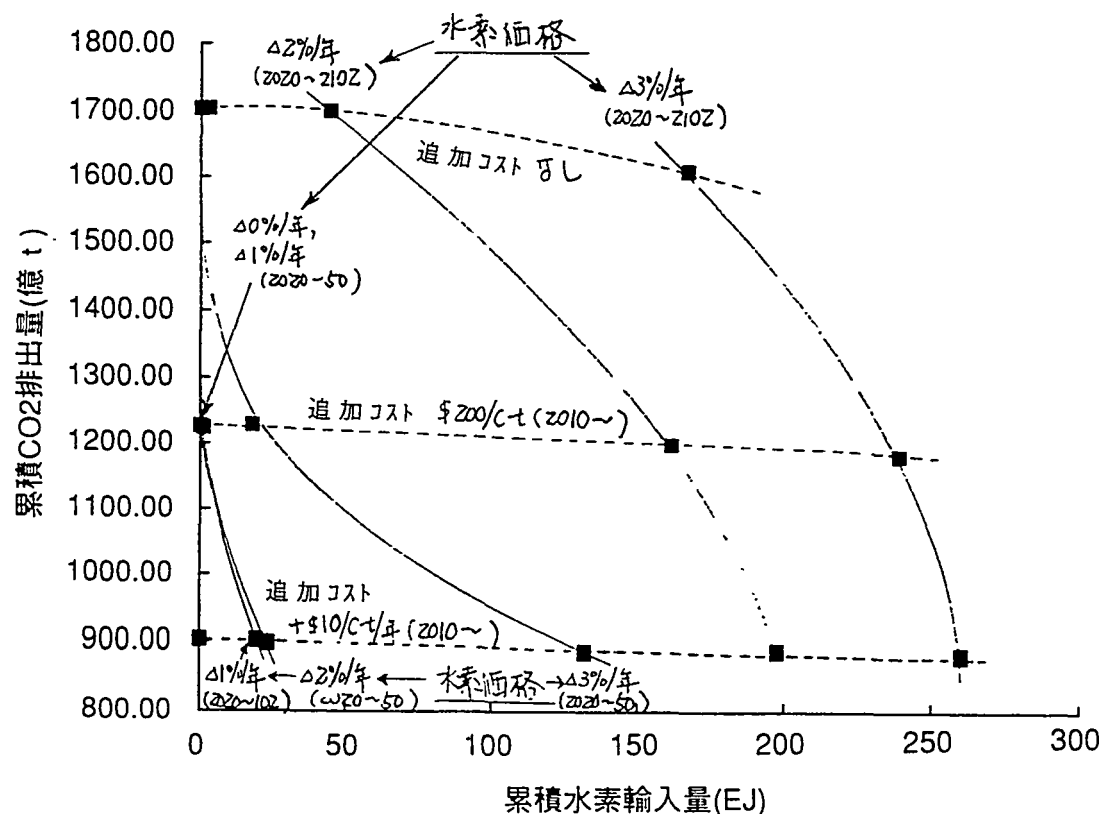


図3.1-34 追加コスト考慮時（ケース2）のCO₂排出量と水素輸入量の関係

- (注) 1. 追加コストと水素価格をパラメータ
2. 縦軸、横軸はともに1985~2102年の累積値

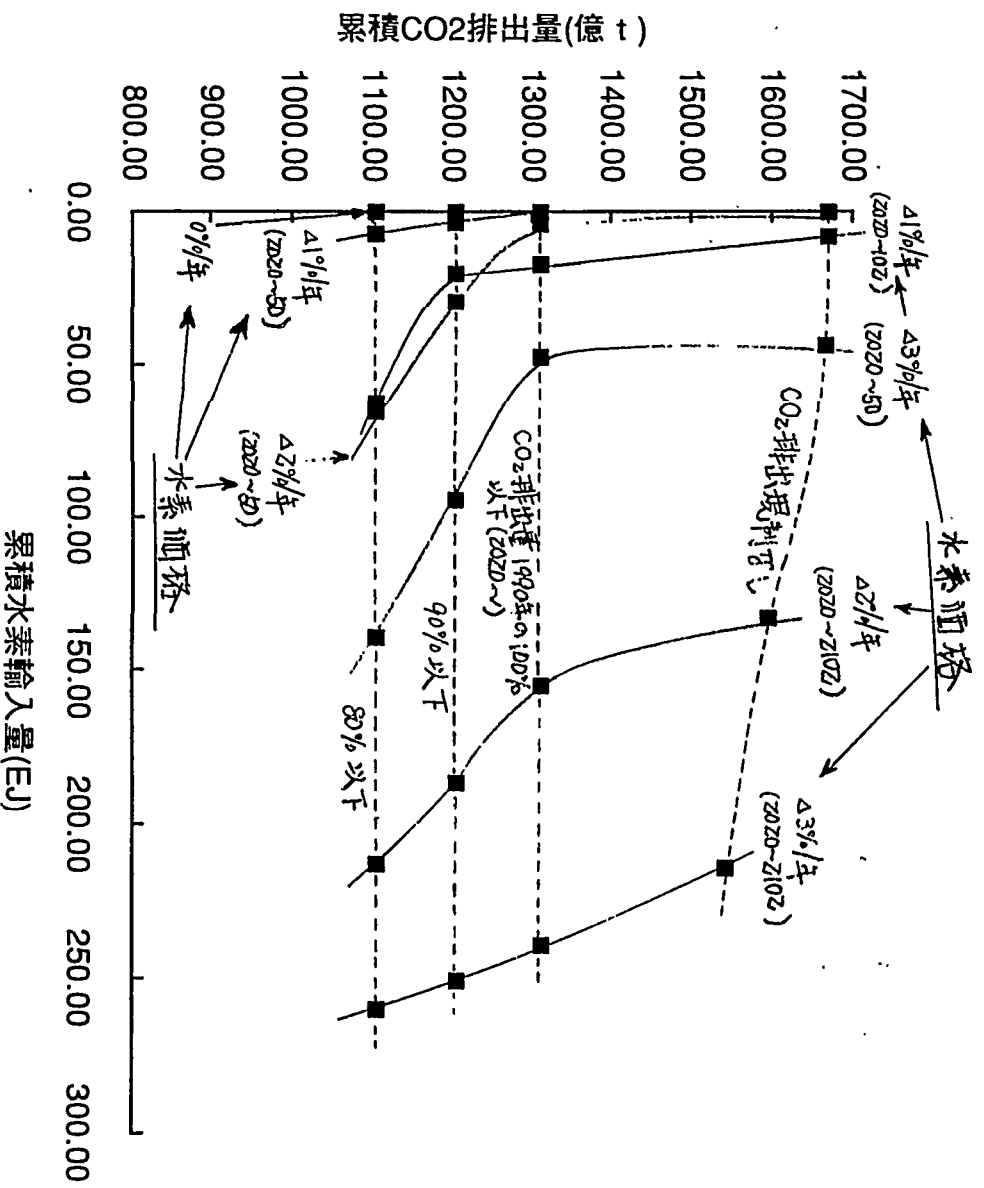


図3.1-35 化石燃料価格変化時（ケース3）のCO₂排出量と水素輸入量の関係

- (注) 1. CO₂排出量抑制量と水素価格をパラメータ
2. 縦軸、横軸はともに1985~2102年の累積値

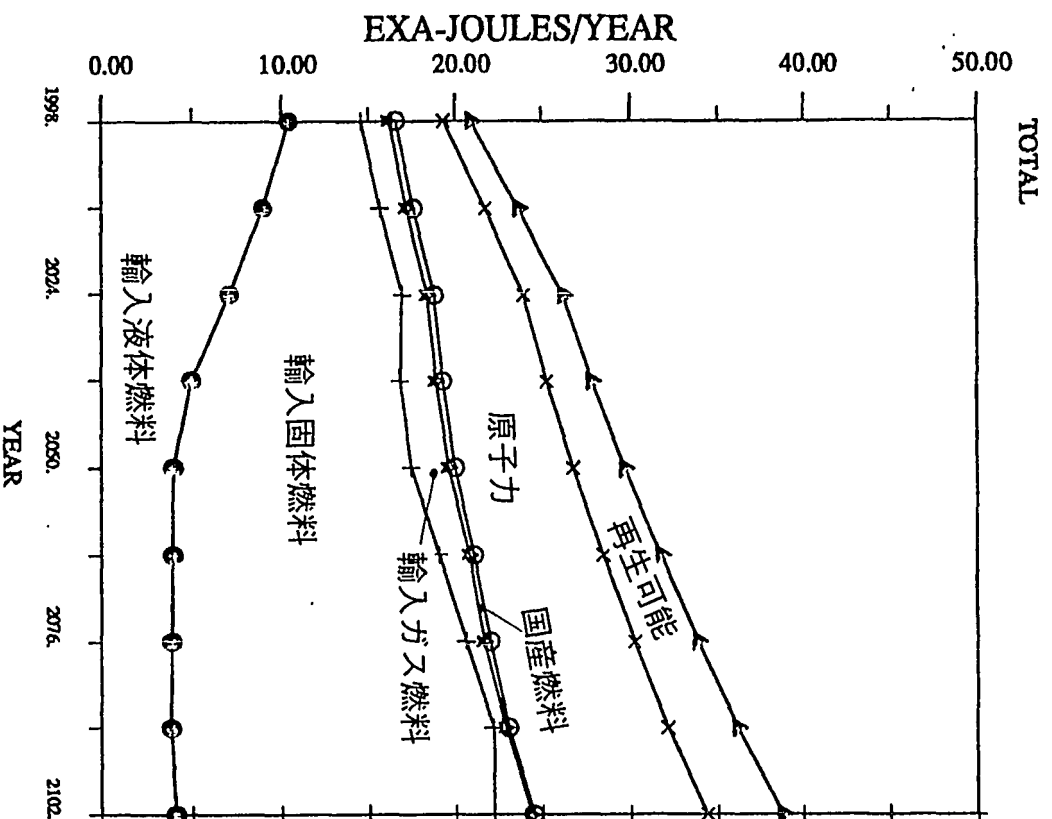


図3.1-36 ある想定条件のもとでの一次エネルギー供給の計算結果
 (注) 1. ケース1で水素価格の低下なし、CO₂排出量抑制なしの場合
 2. 水素輸入量は輸入ガス燃料に含む

3. 1. 4 都市規模での予測評価

水素エネルギーの社会への導入に当たっては、水素エネルギーの特性を生かした従来のエネルギー供給方式とは異なる新しい供給方式が必要になると見込まれる。また、水素エネルギーの利用形態についても、概念としては様々なものが考えられるが、水素の特性を活かし、かつ、コスト的にも安い技術をより優先的に採用していくことが重要である。

このため、本プロジェクトにおいては、実社会への水素エネルギー導入の最もフィージブル形態を予測するため、水素エネルギーの都市部での利用を想定し、水素の都市内の需要地への供給方法、水素の導入効果を最大化する利用形態等について予測評価を行っている。具体的には、エネルギーの需給構造、エネルギー利用の地域特性、都市環境等種々のデータが容易に入手できるロンドンを対象とした調査・検討を、英国の調査機関であるロンドン・リサーチ・センター及びインペリアル・カレッジ・コンサルタントへの委託により実施した。

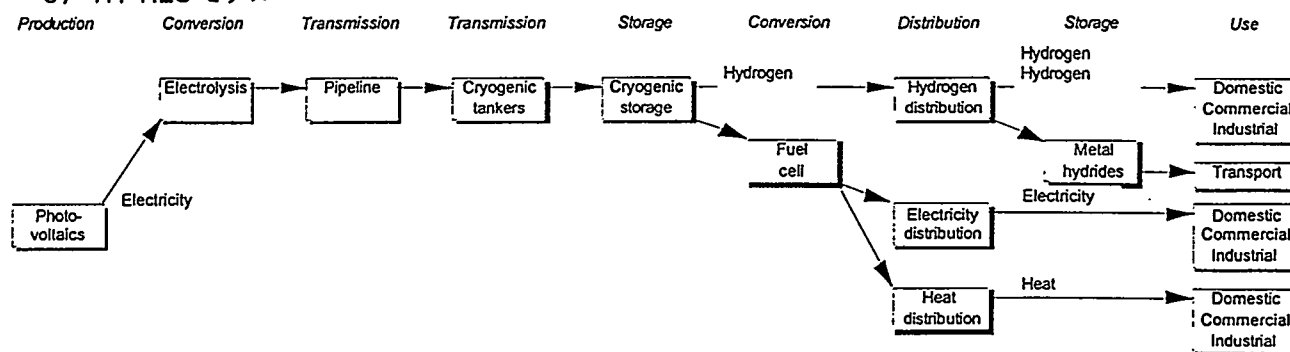
以下にこれまで得られた調査結果を記述する。

(1) 水素供給・利用システムの検討

都市部で水素を供給・利用するための概念設計を行うためにモデルを開発し、そのモデルを利用して水素供給・利用システムの評価を以下の手順で行った。

まず、水素の供給・利用形態を評価するためのモデルとしてHY-RESモデル(Hydrogen-Reference Energy System Model)を策定した。(図3.1-37)

図 3.1 - 37 HY-RES モデル



(注) HY-RESモデルは、1971年に米国ブルックヘブン国立研究所で開発された「RES」の概念に基づく解析モデル(RESモデル)を、委託先であるロンドン・リサーチ・センター及びインペリアル・カレッジ・コンサルタントが、水素エネルギー用に改良したものである。

次に、HY-RESモデルに従って、将来予想される水素供給・利用システムとして集中型と分散型の2つを想定し、それぞれの得失を分析した。分析対象の地域としては、ロンドン西方の郊外に位置するキングストン地区を選定し、熱供給のための最小ユニットと考えられる3 km四方の「升目」の中でのエネルギー供給システムを検討した。

集中型の供給システムとしては、「升目」の中心部に1カ所にのみ燃料電池及び熱プラントを拠点として設置するものを考えた。この拠点では、外部からパイプラインで輸送された液体水素から電力及び熱を発生させ、各需要先に電力、熱及び液体水素を供給する。分散型の供給システムは、「升目」の中に燃料電池による熱電供給拠点を多数配置するとともにそれらをつなぐ配管のネットワークを設置し、外部からパイプラインで輸送されてくる水素ガスをそれぞれの分散型熱電供給拠点で電力及び熱に変換し、水素ガスと共に末端のユーザーに供給するものである。（図3.1-38～40）

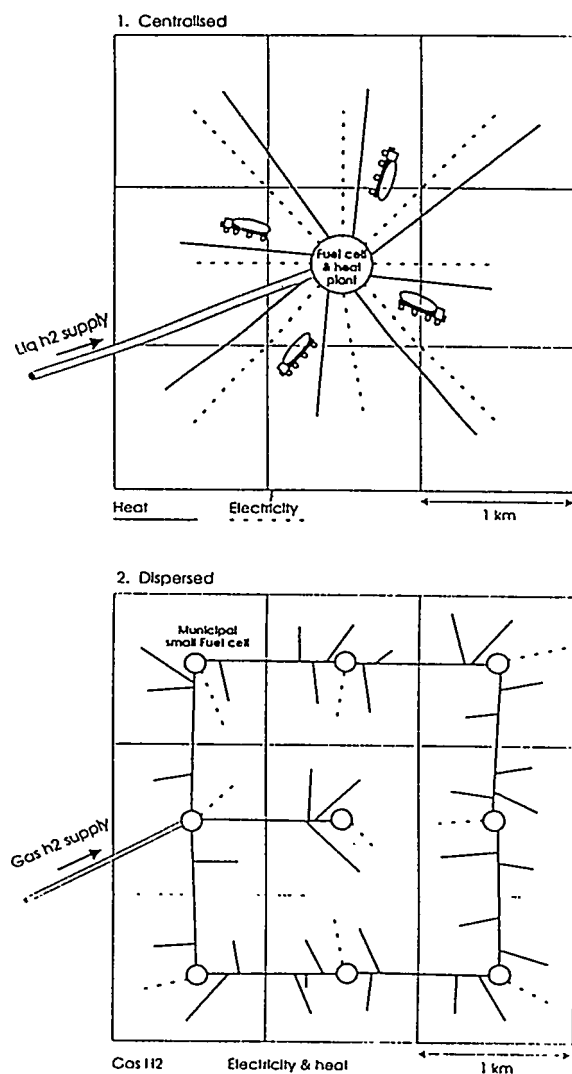


図 3.1 - 38 考えられる水素供給システム

図 3.1 - 39 集中型供給利用システム概念図

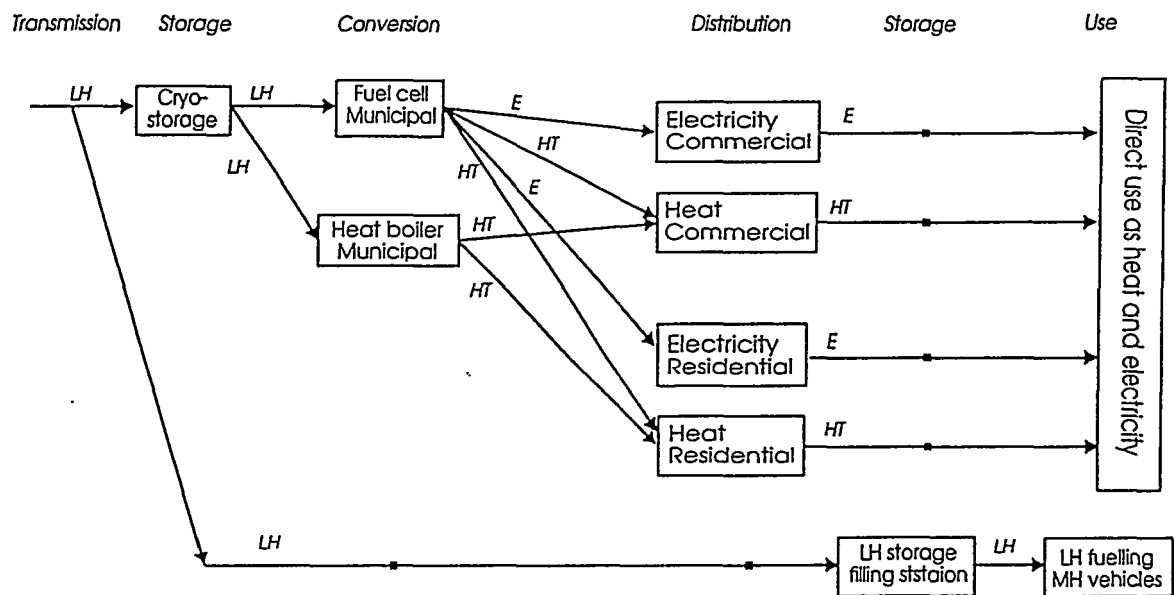
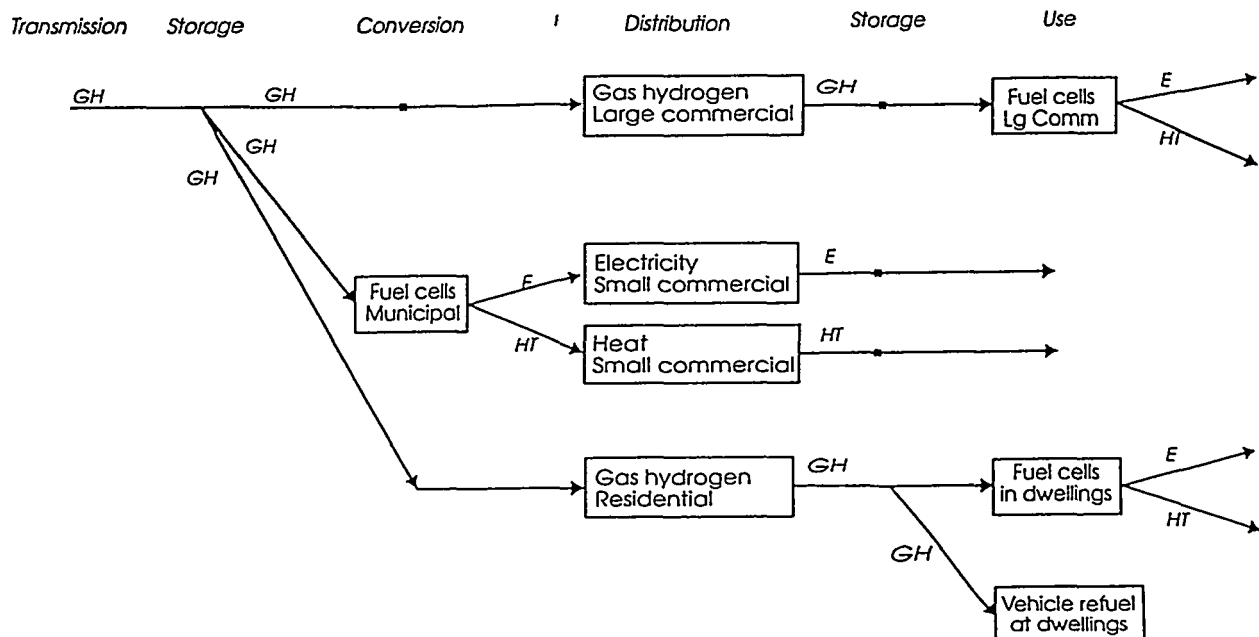


図 3.1 - 40 分散型供給利用システム概念図



これらの2つのシステムで必要となる水素の量について、HY-RESモデルにより推定したところ、集中型の供給システムの方が最終消費エネルギー量は少ないことが判明した。これは、エネルギーの損失（ロス）が集中型の場合、中心部の燃料電池のみで発生するのに対し、分散型供給システムでは最終利用の設備において発生するためである。

他方、水素供給・利用に係るコストを比較するために、水素の末端価格をHY-RESモデルにより推計した。末端価格には、水素製造、輸送、変換、貯蔵、供給及び利用の各段階で必要となる資本・運転コスト等が含まれる。計算の結果、水素の末端価格には両者の間で殆ど差が見られなかった。

これらの結果を総合すると、供給・利用に係るコストに大きな差がないことから、既存のエネルギー供給形態からより容易に移行できる方を各都市毎に選択することがよいとの推論を得た。

また、環境面から、都市外部にある火力発電所による大規模発電と水素の都市部への導入を比較したところ、後者の方がはるかに環境への影響が小さくなるとの結果が得られ、都市部への水素エネルギーの導入は環境面からも大きなメリットを有するとの結論が得られた。

(2) 水素導入における最適技術の検討

様々な領域に水素エネルギーが活用される前段階として、ある一定の割合の水素を導入する場合の最適技術についての評価方法を作成し、実際にロンドンを例とした評価を以下の手順で行った。

まず、ロンドンに水素エネルギーを導入するための第1ステップとして、天然ガスの供給量の10%を水素で置き換える場合の最善の利用方法を検討した。ここでは、以下の3つのシナリオを想定し、それぞれについて水素導入のコストとベネフィットを比較した。次に、シナリオの比較は、ロンドンの都心部(Central)、市街地(Inner)、郊外(Outer)の3地域について行った。(図3.1-41)

① 第1のシナリオ（基準シナリオ）

エネルギー需給構造に水素が全く導入されないと仮定するシナリオ。エネ

ルギーの媒体を、石油、天然ガス及び電力に限定している。都市の中心部で燃料電池又はガスタービンにより、コジェネレーションを行う。

②第2のシナリオ（ハイトン・シナリオ）

天然ガスにある一定量の水素を加えたハイトン（メタンと水素の混合ガス）を既存の天然ガスの利用分野において消費する。

③第3のシナリオ（ニッチ・マーケット・シナリオ）

ある特定の技術に純粋水素を利用するシナリオ。水素利用技術のオプションとしては、2015年頃に広く利用されていると考えられる技術で、かつ、多量の水素を利用でき、環境への便益が高く、コスト及び技術について現在でも十分な評価を行えるものを選んだ。（自動車やガスタービンなど）

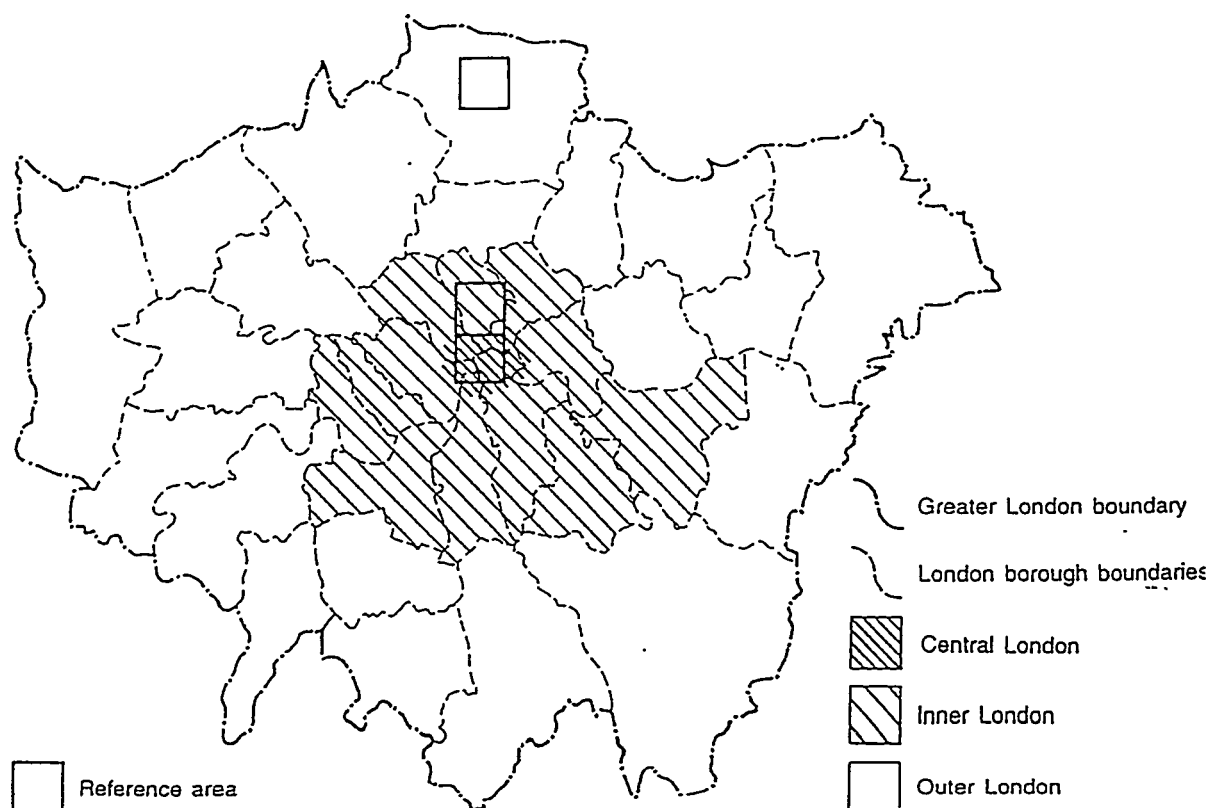


図 3.1 - 41 対象とした地域の地図

これらのシナリオにおいて、水素を都市部に導入する際の得失を比較するために、「プレミアム」という概念を導入した。「プレミアム」とは、水素を導入することによる利益を金銭換算したものであり、外部コスト（大気汚染による健康、森林、建物への影響、作物被害、地球温暖化等の影響による被害額）や設備投資にかかる費用等をもとにして算出される。（表3.1-11）

表 3.1 - 11 エネルギー使用の外部コスト (単位: \$/kg)

汚染物質	外部コスト（高く見積もったケース）			外部コスト（低く見積もったケース）		
	都心部	中間地域	郊外地域	都心部	中間地域	郊外地域
Nitrogen oxides	34	34	26	0.56	0.56	0.56
Sulphur dioxide	25	16	15	0.72	0.72	0.72
Volatile organic compounds	24	23	20	0.40	0.40	0.40
Carbon dioxide	0.053	0.053	0.053	0.005	0.005	0.005
Carbon monoxide	6	6	3	1.10	1.10	1.10
Particulates	21	15	8	8.0	8.0	8.0

上記の3つのシナリオについて検討した結果、ハイタン・シナリオの方がニッチ・マーケット・シナリオよりも、プレミアムが高くなった。すなわち、ロンドンに水素エネルギーを導入する場合、自動車やガスタービンといった特定の技術に純粋水素を導入するよりも、天然ガスに水素を混合したハイタンとして利用の方が、NOxやCOなどの汚染物質を大幅に削減させ、また、既存のインフラを使用できることから、より有効であるとの結論が得られた。この傾向は都市の中心部でも郊外部でも同様である。（次頁：図3.1-42, 43）

しかしながら、ハイタンには、天然ガス中の濃度が5%以上になると汚染物質削減の効果がそれ以上に向上しないという性質があり、それ以上の水素の天然ガスへの混入はメリットが小さく、5%以上の水素の導入においては、ニッチ・マーケット・シナリオが有効であるとの推論を行った。すなわち、天然ガスの5%を水素に置き換えるまではハイタンを利用し、5%から10%までの導入量増大においては、例えば都市中心部に純粋水素によるガスタービン発電を導入する方が有効であるとのシナリオを得ることができた。

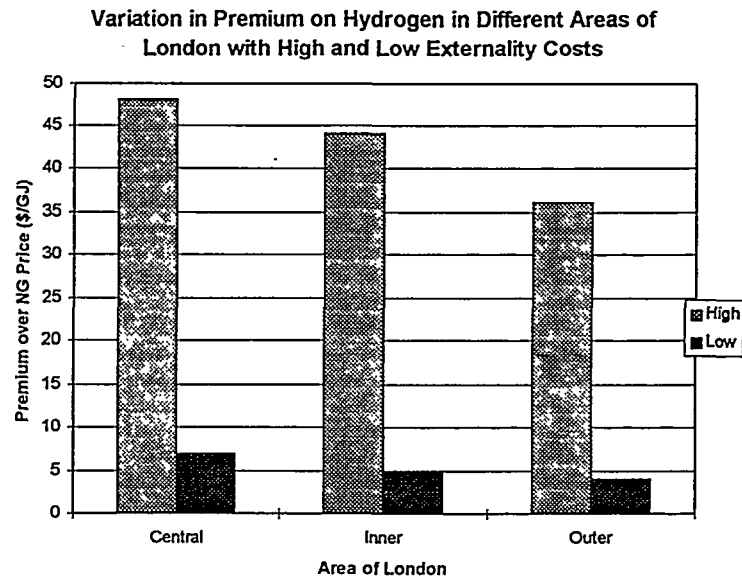


図 3.1-42 ハイタンシナリオにおける水素導入プレミアム

{ High: 環境に対する外部コストが高い場合
 Low : 環境に対する外部コストが低い場合

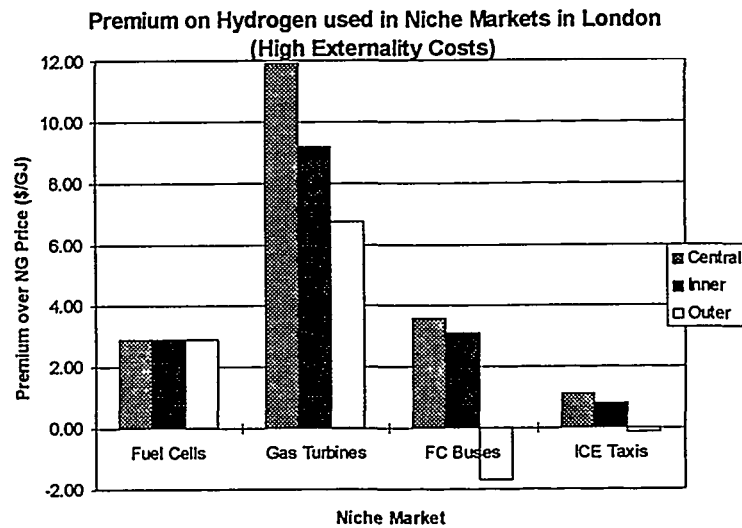


図 3.1-43 ニッチマーケットシナリオにおける水素導入プレミアム

(環境に対する外部コストが高い場合)

(3) 今後の予定

ハイタンを特定の用途に利用した技術のプレミアムや水素以外の排出抑制技術のプレミアムを評価し、地域別に導入効果の高い技術を検討する方法を検討していく。また、都市によるエネルギー需給構造の相違（例えば、東京の方がエアコンの普及が高いため、電気のピークが夏にくるが、ロンドンでは暖房システムの利用により冬にピークがくる等）に鑑み、次のモデル都市を東京とし、都市による水素導入のシナリオの違いを検討していく。

3. 1. 5 安全対策

水素の製造・貯蔵・輸送・利用を含むシステム技術の全ての分野において、運転時のトラブル、水素爆発・火災などの重大な事故を防止し、事故の影響を最小限に抑える安全対策とその評価技術の蓄積が極めて重要である。

また、本プロジェクトを遂行していく上でも、安全対策に万全を期することが不可欠である。このため、水素の安全性について、以下の調査研究を行った。

①安全設計の明確化

国内外の液体水素製造プラントにおける安全思想、設計指針に適用されている法令、規格、基準類の調査を行う。また、各プラント毎の異常・事故事例を抽出し、異常検知、異常発生防止及び防護手段などの安全機能を明確化させる。この結果、予想される事故を未然に防止し、また、発生した場合にも被害を最小限に留めるべく防護計画を立てて設備設計に反映させるための安全設計指針を策定することが必要である。

このため、平成8年度までに、下記に示す水素関連の事業所、研究機関への訪問調査、専門家へのインタビュー、文献調査等を通じて安全上の基本事項、具体的安全対策例を整理した。

国内： 宇宙開発事業団、航空宇宙技術研究所、
岩谷瓦斯（株）、太平洋液水（株）ほか

国外： 米国 ロスアラモス研究所、EPRI（アメリカの電中研）、
Ergo-Tech（民間コンサルティング会社）

ドイツ DLR（ドイツの航空宇宙技術研究所）、TUV（ドイツの高圧ガス保安協会）

BAM（ドイツの国立研究所）、KFA（ドイツの国立研究所）

カナダ McGill大学ほか

国内においては、高圧ガス保安法（旧名：高圧ガス取締法）の法体系、電気事業法の規制内容とそれらのバックグラウンドを整理した。

また、各システム技術の安全対策に役立てるべく、下記の事例調査を実施

した。

国内： 事故統計（発生件数の推移、火災・爆発等の区分、原因、死傷者数など）の調査。

前記の事業所、研究機関が有しているトラブル事例とその対策

国外： 主要な事故の報告書レビュー（飛行船ヒンデンプルグ号、スペースシャトル・チャレンジャー号、スリーマイル島原子炉事故、北海ガス田の事故ほか）

さらに、水素の製造、貯蔵、輸送及び利用の各タスクでの概念設計情報、試験設備・中規模プラントの詳細設計情報を収集した。また、安全サイドで調査した情報を必要に応じ関連タスクに提供した。

②各種事故の安全解析

事故・故障による損失レベルを推定するコンピュータシミュレーションは、安全解析のための有力な手段である。本項目では、安全解析のため、シミュレーションモデルの開発、そのためのデータ収集、既存モデルの調査を行い、各システム技術に関する安全解析方針を策定・検討することが重要である。

このため、液体水素による事故防止のための安全解析手法として、(a)液体水素が流出した場合のコンピュータシミュレーション解析、(b)圧縮水素ガスの爆発・火災を起こした場合のコンピュータシミュレーション解析を行っている。

(a)液体水素拡散挙動コンピュータシミュレーション解析

液体水素の流出～爆発をシミュレートした報告がなされていないため、大量の液体水素が流出した場合の、可燃性蒸気雲の形成と爆発・火災による周辺への被害の程度を予測するためのシミュレーションコードの開発に取り組んだ。既存コードの改良もしくは新規コードの開発により、独自にモデル化を行った。

NASAのホワイトサンズ研究所では、1500ガロンの液体水素流出に伴う可燃

性蒸気雲の形成を観察した実験が報告されており、その実験で計測された気相の水素濃度分布とコンピューターによる計算結果(気液2相流の挙動を扱うCAMPAGNEコードを利用した)を比較した。その結果、水素の拡散の概略挙動は一致したが、濃度分布と広がり範囲の絶対値は、計算結果のほうが小さかった。

この原因として、以下の2点が考えられる。

(イ)流出時の蒸発速度として、実験式を用いているが、この実験式は、地面と液体が接触した瞬間には適用されないが、計算では、一律に適用されている。

(ロ)液体内に存在する気泡径や、液体と気泡の抵抗係数等、2相流の状況が未知であり、現在では、これらに対して仮定した数値を用いている。

(b)圧縮水素ガスの爆発・火災コンピュータシミュレーション解析

圧縮水素タンクが爆発した場合、爆風圧・火炎による輻射熱又はタンク材の破片である飛翔物がそれぞれ発生し、周辺に被害を及ぼす。まず、爆風圧が人間(肺、鼓膜)や構造物との距離に応じて、どの程度の被害を及ぼすかをパソコン上で計算・表示する機能を組み込んだ。次に、輻射熱の被害の程度(人の火傷や構造物の火災)については、平成7年度から着手し、前者と同様に現在パソコン上に組み込み中である。平成8年度ではさらに、飛翔物(破片)による被害の程度をパソコン上で予測する機能として、破片のサイズ分布・速度、最大飛距離を計算し、災害の発生する範囲と程度を表示する機能及び経済性機能を加えた爆発シミュレーションコードを完成する予定で進めている。

今後は、これらの成果を踏まえ、平成9年度に各々のシミュレーションコードの改良と統合過程での問題点を抽出し、液体水素流出～爆発等に至る影響を一貫して評価できるように、平成10年度には上記2つのシミュレーションコードの統合に着手し、試解析結果を検討する予定である。

3. 2 国際協力推進のための調査・検討

W E - N E T の全体構想は、再生可能エネルギーを二次エネルギーである水素エネルギーに変換して、国際的なエネルギー・ネットワークを構築するものであり、その実現に当たっては、世界的規模の取り組みが不可欠である。このため、W E - N E T の全体構想の実現に向けた国際協力を推進し、発展させることを目的とし、次の4つの事項を柱とした調査・検討を行った。

- ・ 諸外国における研究開発動向に関する調査
- ・ W E - N E T への国際的な理解と協力を得るための施策
- ・ 国際的技術情報交換を推進するための施策
- ・ 国際協力の長期ビジョン策定のための検討

以下にその成果を示す。

(1) 諸外国の研究開発動向に関する調査

諸外国における水素エネルギー関連技術に関するプロジェクトの事例について調査を行い、主なものについてその内容を整理した。(表3.2-1)

(2) 国際的な理解と協力を得るための施策

W E - N E T の全体構想の実現のためには、その構想自体が海外の機関・関係者に広く、正しく理解されることが極めて重要である。このため、恒常的な情報交換の相手先としてリストアップされた約120の海外関係機関へ、平成6年度の本プロジェクトの成果概要(英文版)を送付した。このうちの一部機関からは、それらが手がけているプロジェクトに関する資料の提供も受けており、各国関係機関との間の双方向のコミュニケーションが形成されつつある。

さらに、各種の機会を生かすとの趣旨から、表3.2-2に示す国際シンポジウムにおいてW E - N E T の全体構想及び各研究開発内容に関する30件の発表を行った。

(3) 国際的な情報交換を推進するための施策

本プロジェクトを国際協力の下で国際共同研究へと発展させていくためには、

関係各国政府と密接な連携を図りながら、関係機関との定期的情報交換及び研究協力を実施してゆくことが不可欠である。これらの情報交換及び研究協力を推進していくための施策立案の基盤として、下記の活動を実施した。

① 各国研究機関と技術情報交換の推進及び海外調査

前述した英文の成果概要の配布先との関係強化を当面の課題とし、情報交換を推進するとともに、これまでに調査した結果、必要であると認められた関係先について、現地調査を実施した。

② 国際シンポジウムの開催

本プロジェクトに対する国際的理解と協力を得るための施策として平成7年2月に通商産業省の後援を受け、国際シンポジウムを東京で開催した。テーマを水素エネルギーに限定せず、クリーンエネルギー全般としたところ、海外11カ国、総数434名の参加があり、活発な議論が行われた。

③ W E - N E T 国際ワークショップの開催

前項のシンポジウムと同様の目的で、第1回W E - N E T 国際ワークショップを平成8年2月東京で開催し、海外7機関の研究発表を行った。このワークショップは、テーマを本プロジェクトにおける研究に特定して行ったところ、総数104名の参加があり、活発な議論が行われた。（表3.2-3参照）

④ 海外機関との研究協力

海外研究機関との共同研究・協力案件として次の2件を実施した。

- ・スタンフォード大学への外注調査による、水素自動車導入による都市大気汚染改善効果の評価研究
- ・水素利用に関する世界的啓蒙・教育を目的とするビデオ『Element one』の作成に対する協力

(4) 国際協力の長期ビジョン策定のための検討

本プロジェクトにおける国際協力の段階的な発展形態を明らかにすべく、現

在、国際協力のための前提・課題の整理及び必要となる施策の立案など国際協力の長期ビジョンの策定を行っているところである。

本ビジョンにおいては、国際協力のための前提としては、①各国が賛同できるようなプロジェクトのフィロソフィー、②参加・協力することで享受しうる各国メリット、③各国の政策と調和したシナジー効果が得られるような展開シナリオを明示すること、の4点を重要な課題として位置づける予定である。

今後とも、本調査・検討においては、引き続き国際協力推進のための種々の施策の企画・立案を図るとともに、海外関連研究機関との一層の交流推進を図り、各種の協力を行っていくこととしている。

表 3.2 - 1 海外の主要な水素エネルギーシステム技術開発プロジェクト

プロジェクト	国名	プロジェクト概要	参加者	期間
[EQHHPP] 出資者: EU各国 カナダ政府 ケベック州 参加機関	カナダ EU連合 ドイツ イタリア フランス ベルギー スイス	カナダの水力発電電力で水素を製造しヨーロッパへ輸送・貯蔵して利用するシステムの検討、利用技術の開発。現在は水素自動車ほか利用技術を開発中	カナダ: Hydro-Quebec ほか 12 ドイツ: LBS ほか 23 イタリア、フランス スペイン、ベルギー : Air Liquide ほか 7	Ph. 1 1986- Ph. 2 1989- Ph. 3 1991- 現在継続中
[HYSOLAR] 出資者: ドイツ政府 サウジKACST 参加機関	ドイツと サウジアラビア	太陽光発電と水素製造のシステム(350kW) 実験プラント設置。基礎研究、システム及び利用技術の研究	ドイツ: DLR, Stuttgart Univ. サウジアラビア: KACST, Univ. in Riyadh , Jiddah, Dhahran	Ph. 1A 1986- Ph. 1B 1990- Ph. 2 1992- 1995年に完了
[SWB] 出資者: ドイツ政府 ババリア州 Bayernwerk 参加機関	ドイツ	太陽光発電—水電解—燃料電池発電の一貫システム実験プラントを設置。(80kW) 水素自動車への燃料供給、燃料電池フォークリフトの研究継続中	SWB GmbH BMW, Linde, Siemens	Ph. 0 1985- Ph. 1 1987- Ph. 2 1992- 継続中
[München空港 水素自動車プロジェクト] 出資者: ババリア州 参加機関	ドイツ	空港内に水素製造、貯蔵設備を設置し、空港内の車両を水素自動車に転換する	Daimler-Benz Aero. BMW Lufthanza 航空ほか	Ph. 1 1995- Ph. 2 1996- Ph. 3 1998-
[Bad Brücken au水素プロジェクト] 出資者: ババリア州 参加機関	ドイツ	保養村の集中給湯暖房を水素燃料のボイラと燃料電池で行うほか、金属工場への水素供給や自動車への水素燃料供給を行う。水素はバイオマス(木材のガス化)技術で製造する。	Daimler-Benz Aero.	Ph. 0 1995- Ph. 1 1998- Ph. 2 2001-

プロジェクト	国名	プロジェクト概要	参加者	期間
[Hydrogen Vehicle Project] 出資者 EU 参加機関	フランス イタリア スウェーデン	液体水素燃料の PEM 燃料電池車 (Renault Laguna を改造) を共同開発する。 FC:35-40kW 走行距離:600km 車両:Station Wagon	Renault (フランス) Air Liquide (") Ansaldo (イタリア) Denola (") Volvo (スウェーデン)	1995-1997
[Fuel Cell Bus Project] 出資者 EU 参加機関	ドイツ フランス イタリア	加圧水素燃料の PEM 燃料電池バスを共同開発する。 FC:50-60kW 車両: 大型バス	Neoplan (ドイツ) Air Liquide (フランス) Ansaldo (イタリア) Denola (")	1996-1999
[Clean Air Now / Xerox Solar Hydro-gen Vehicle Project] 出資者: DOE, SCAQMD Xerox	米国	太陽光発電—水電解—水素ガス貯蔵—水素ディスペンサーによる独立した水素スタンドと水素エンジン車の実験プロジェクト。 Xerox の車両を水素自動車にして実用試験を行う。	Clean Air Now Xerox	1994-1997
[Chrysler 燃料電池車プロジェクト] 出資者: DOE, SCAQMD 参加機関	米国	水素燃料の PEM 燃料電池自動車を開発する。	Chrysler Allied Signal	1993-1998
[Chicago 市 燃料電池バスプロジェクト] 出資者: Chicago 市	米国 カナダ	加圧水素燃料の PEM 燃料電池大型バス 3 台を市営バスとしてテスト運行する。 実際の運行は1997より開始	Ballard P.S.	1995-
DOE Hydrogen Program	米国	米国の長期水素エネルギー計画 水素製造、貯蔵、利用等の技術開発と水素の市場導入を図る計画	米国の参加者多数	1991-

表 3.2 - 2 国際シンポジウムでの発表実績

1. 水素利用クリーンエネルギー国際シンポジウム (1995. 2. 6-8 東京)

Session	テーマ	発表者	Oral/Poster
Keynote Lecture	R&D Plans for WE-NET	新エネルギー・産業技術総合開発機構 村瀬盛夫	Oral
Technical Lecture	Current R&D Activities in WE-NET Project	エネルギー総合工学研究所 福田健三	
	Hydrogen Turbine Power Generation System	電力中央研究所 植田清隆	
Poster Session	Development on Solid Polymer Electrolyte Water Electrolysis	三菱重工長崎研究所 永井正彦	Poster
	Influence of the Basic Properties of Porous Electrode to Cell Voltage in Water Electrolysis	ジャパンエナジー 材料研究所 新井良幸	
	A Study of the Large Hydrogen Liquefaction Process	日本酸素宇宙低温機器開発Gr 岩本一帆	
	Concept of Combustor for Hydrogen-Oxygen Combustion Turbine	石川島播磨重工技術研究所 安 昭八	

2. 7th Canadian Hydrogen Workshop (1995. 6. 4-6 カナダ Québec)

Session	テーマ	発表者	Oral/Poster
-	WE-NET Program	エネルギー総合工学研究所 福田健三	Oral

3. 2nd World Hydrogen Summit (1995. 9. 28-29 カナダ Montréal)

Session	テーマ	発表者	Oral/Poster
Plenary	The WE-NET Program : Vision and Status	エソジエアリング振興協会 岡野一清	Oral

4. Pacific Rim Environmental Conference (1995.10.2-4 米国 San Fransisco)

Session	テーマ	発表者	Oral/Poster
Fuel Cell	Role of Fuel Cells in the WE-NET Program	エソジエアリング振興協会 岡野一清	Oral

5. 7th Annual Meeting of National Hydrogen Association (1996.4.2-4 米国 Alexandria)

Session	テーマ	発表者	Oral/Poster
National Hydrogen Program	WE-NET: The National Hydrogen Program	エンジニアリング振興協会 岡野一清	Oral

6. Hydrogen Symposium of Québec University (1996.4.10 カナダ Trois-Rivières)

Session	テーマ	発表者	Oral/Poster
-	WE-NET: The National Hydrogen Program	エンジニアリング振興協会 岡野一清	Oral

7. 16th International Cryogenic Engineering and Materials Conf. (1996.5.20-24 福岡)

Session	テーマ	発表者	Oral/Poster
-	Theoretical Calculation of the Large Hydrogen Liquefaction Process	日本酸素 松田 洋	Oral

8. Annual Meeting of IOMA (国際酸素製造者協会) (1996. 10.29 オーストリア Wien)

Session	テーマ	発表者	Oral/Poster
-	Japan's WE-NET Project	岩谷産業 武松敏弼	Oral

9. Hydrogen'96 世界水素エネルギー会議 (1996.6.25-28 ドイツ Stuttgart)

Session	テーマ	発表者	Oral/Poster
Plenary Lecture	WE-NET Comprehensive hydrogen energy R&D project in Japan	エネルギー 総合工学研究所 WE-NETセンター 福田健三	Oral
1. Transition to hydrogen-based energy systems	サテライト 3 Strategies and system concepts for hydrogen utilization in an urban environment	Imperial College of Science David Hutchinson	
5.2 Safety aspects of hydrogen application	サテライト 3 Computer Simulation of Explosion of a Hydrogen Storage Tank	SRI M. Sanai	
	サテライト 3 Simulation of the formation and dispersion of hydrogen vapour clouds	三菱重工(株)原子力技術センター 千歳敬子、森井 正 ARTEC 小川由美	

Session	テーマ	発表者	Oral/Poster
2.2 Electrolysis	※タスク 4 Development of Solid Polymer Electrolyte Water Electrolysis Tech. for High Current Density and Energy Efficiency	三菱重工(株) 長崎研究所 永井正彦	Poster
	※タスク 4 R&D of SPE High Performance Water Electrolyzer by Hot-Press Method in WE-NET	(株)富士電機総合研究所 環境・エネルギー研究所 山口幹昌	
3.1 Stationary storage systems	※タスク 5 Technical Dev. for Large Storage of LH ₂ in WE-NET	川崎重工(株)関東技研 岩田 章	
3.5 Hydrogen transport and distribution	※タスク 5 Studies of the Large Scale Sea Transportation of the Liquid Hydrogen	石川島播磨重工(株) 船舶海洋技術統括部 阿部昭則	Oral
5.1 Materials for hydrogen tech.	※タスク 6 Evaluation Test of Low Temp. Structural Materials used for Liquid Hydrogen Storage and Transportation System	JRCM 堀谷貴雄	Poster
	※タスク 6 Hydrogen Embrittlement of Austenitic Stainless Steels	住友金属鉄鋼技術研究所 岡口秀治	
	※タスク 6 Effect of σ -Ferrite phase in weld metal of Austenitic Stainless Steels on Low Temperature Embrittlement	三菱重工(株) 長崎研究所 斉藤正洋	
	※タスク 6 Effect of Testing Temperature on Hydrogen Circumstantial Embrittlement of Stainless Steels and Aluminum Alloy	中国工業技術研究所 横川清志	
4. Technologies of hydrogen utilization 4.3 Fuel Cells	※タスク 7 R&D of Hydrogen Utilization Technologies : WE-NET Program and Fuel Cell Activities in Japan	エンジニアリング振興協会 岡野一清	Oral
4.2 Combustion systems	※タスク 8 水素燃焼タービンサイクル及びシステム構成の研究	三菱重工(株)高砂製作所 梶下、上松	
	※タスク 8 Hydrogen Combustion Characteristics in a model burner with a coaxial injector	(株)日立製作所電力・電機開発本部火力部 橋本 孝	
	※タスク 8 Study of Film Cooling with Shaped Holes for a Hydrogen Combustion Turbine Blade	石川島播磨重工(株) 山脇栄道、真家 孝 安 昭八	Poster

表 3.2 - 3 第1回 WE-NET International Workshop発表内容

1996. 2. 20 (財) エンジニアリング振興協会会議室

サブタスク	テーマ	発表者
2	Long-Term Potential for Air Quality Improvement in the Tokyo Metropolitan Area from Use of Hydrogen Fuel in Transportaion	Paul Kruger Civil Engineering Dept. Stanford University (USA)
	Canadian Proposal for Participation in Japan's WE-NET Program	M. Rubuli Hydrogen Industry Council (Canada)
3	Strategies and System Concept for Hydrogen Utilization in an Urban Environment	David Hart Imperial College of Science (UK)
4	Development of High Temperature Solid Polymer Electrolytes for Hydrogen Production	Susanna C. Ventura SRI International (USA)
5	Design of Large LH ₂ Tank Utilizing Vacuum Panels	Patrick Sanglan Air Liquide (France)
	Development of High-performance Nanocrystalline Hydrides	A. Zaluska McGill University (Canada)
7	Bavarian Hydrogen Demonstration Projects	S. Weingartner Daimler-Benz Aerospace (Germany)

3. 3 水素製造技術

水素を二次エネルギーとする全体システムを確立するためには、水素を安定かつ安価に供給する高効率・大容量の水素製造技術を実現することが不可欠である。

このため、従来の水素製造法に比べて高効率化・低コスト化が期待できる固体高分子電解質水電解法による水素製造技術の確立を目的として、4つの方式についての開発を行い、将来の大型水電解法としてのフィージビリティについて評価した。図3.3-1に固体高分子電解質水電解法の概念と原理を示す。

また、同時にW E - N E Tの全体構想が長期間であることに鑑み、高電流密度におけるエネルギー変換効率の一層の向上を目的としての耐高温高分子電解質膜の開発に着手した。

(1) エネルギー変換効率の向上及びセルの大型化

① 目標の達成に向けての進め方

第Ⅰ期研究開発基本計画においては、固体高分子電解質水電解法の開発目標を以下のとおりに設定し、電解槽の高効率化、大型化を目指し、小型の実験室規模のセル（以下ラボセルと言う。）から徐々に、スケールアップを図ることとした。まず、ラボセルによる高電流密度下でのセルの性能・耐久性向上のための要素技術の開発を行った。さらに、ベンチスケールプラントの製作・評価に向けた大型化技術の検討を行い、パイロットプラント開発に必要な技術の確立・蓄積を図った。

【第Ⅰ期の目標】

・電流密度	1 A/cm ² 以上
・エネルギー変換効率	90%程度
・電極面積	2,500cm ² （ベンチスケールプラント）

（注）固体高分子電解質水電解法は高電流密度での運転が可能であり、装置がコンパクト化できるので、土地コストの低減による低コスト化が期待できることが特徴。このため、従来型アルカリ水電解の電流密度（0.2～0.4A/cm²）の5～10倍

の電流密度で、それ以上のエネルギー変換効率（実績としてアルカリ水電解では75～80％が最高）を達成すべく目標を設定した（図3.3-2参照）。電極面積については、将来の大型化を目指し、ベンチスケールプラントにおいて $2,500\text{cm}^2$ （縦100cm、横25cm）とし、気液分離特性の影響が表れやすい縦方向を大きくしている。なお、本基本計画では、電流密度は $1\text{A}/\text{cm}^2$ 以上のみを定めているが、当機構においては、更なる高電流密度における高いエネルギー変換効率を目指し、上記に加えて、 $3\text{A}/\text{cm}^2$ の電流密度で80％以上のエネルギー変換効率を達成することを目標値にして研究開発を実施している。

②競争方式による性能向上

上記の目標値を達成するため、各種方式による競争方式（いわゆるコンペ方式）で性能向上を図ることとした。具体的には、本プロジェクトの開始時（平成5年度）に、水電解に関する技術を有する企業からの複数の提案を受け、提案各社への研究開発の再委託による同時並行開発を行い、平成8年度までに方式を絞り込むこととした。

以下に 4方式の概要を示すとともに、それぞれの方式におけるセルの性能の向上の考え方及び現時点までの研究開発の成果を簡略に示す。

(a)無電解メッキ法

固体高分子電解質膜の表面に化学メッキ（無電解メッキ）により、触媒種を担持し、高いエネルギー変換効率を求めることを特徴としている。

これまでに膜厚の影響、触媒種の影響及び給電体材質構造の影響を調査するとともに、セルの性能の向上を図った。当方式におけるセルの構造を図3.3-3に示す。

これまでの最高性能は、電流密度 $1.0\text{A}/\text{cm}^2$ の時、セル電圧1.561Vにおいて、91.8％のエネルギー変換効率を得られている。この方法における性能向上を図る過程において、薄膜化によるオーム損の低減と反応比表面積の増大による過電圧の低減を図るため、表面多孔質化法を開発した。併せて、メッキの方法の最適化を図った（図3.3-4）。

また、触媒種は白金及びイリジウムに関して性能比較を行い、陽極、陰極ともにイリジウムが存在する場合が最も高い性能を示した。給電体としては、材料選定、構造適正化の結果、両極とも表面平滑白金メッキチタン繊維焼結

体が接触抵抗低減に有効であることが判明した。なお、陰極材料としては、ステンレス繊維焼結体も有望である。

(b) ホットプレス法

固体高分子電解質膜に、触媒粉末を加工した触媒フィルムをホットプレスすることにより、高いエネルギー変換効率を求めることを特徴としている。セルの構造は図3.3-5、また、ホットプレス法のイメージは図3.3-6のとおりである。

これまでに、触媒種の影響、触媒担持量の影響及び接合条件の影響を調査するとともに、セルの性能向上を図った。

これまでの最高性能としては、電流密度 $1.0\text{A}/\text{cm}^2$ の時、セル電圧 1.550V において、 95.1% のエネルギー変換効率を得られている。

陽極触媒として二酸化イリジウムが、陰極触媒としては白金黒が優れていることが明らかになった。さらに、触媒担持量は、陽極では $3\text{mg}/\text{cm}^2$ 程度であるが、陰極では $0.5\text{mg}/\text{cm}^2$ まで低減できた。また、接合条件に関しては、触媒粒子の結合強度向上のための最適なフッ素樹脂添加量、膜と触媒層の接触面積を増大するための最適な固体高分子電解質樹脂添加量及びホットプレス条件を明らかにした。

(c) 多孔質焼結体電極法

金属多孔質焼結体の表面に触媒粉末と固体高分子電解質の分散溶液との混合物を担持することにより、高いエネルギー変換効率を求めることを特徴としている。上記(a)及び(b)の2通りの技術との最大の違いは、触媒を電解質膜側に担持するのではなく、給電体側に担持することである。セルの構成を図3.3-7に示した。

これまでに、原料粉粒径、焼結温度、焼結時間の影響及び触媒種並びに担持方法の影響を調べるとともに、セルの性能向上を図った。

これまでの最高性能としては、電流密度 $1.0\text{A}/\text{cm}^2$ の時、セル電圧 1.571V において、 91.6% のエネルギー変換効率を得られている。

また、多孔質電極に適した焼結条件は温度 850°C /粒径 $150\mu\text{m}$ /焼結時間2時

間であることが明らかとなった。陰極触媒としては、平滑白金と白金黒では、後者が優れていること、さらに陽極触媒としては、白金、イリジウム、二酸化イリジウム、二酸化ルテニウム、複合酸化物を比較検討した結果、二酸化イリジウムと二酸化ルテニウムが良好な結果を示すことが判明した。なお、二酸化ルテニウムは溶出劣化の可能性があるので、今後検討する必要がある。

(d)ゼロギャップ法

チタン繊維焼結多孔体にイリジウム金属粉末あるいは熱分解による二酸化イリジウム・二酸化ルテニウム混合粉末をテフロン及びNafion混合液に混練したものをホットプレスすることにより、高いエネルギー変換効率を求めることを特徴としている。セルの構成を図3.3-8、触媒調製プロセスを図3.3-9に示す。

これまでに、触媒種の影響、電解質膜の影響及び電解温度の影響を調べるとともに、セルの性能向上を図った。

これまでの最高性能としては、電流密度 $1.0\text{A}/\text{cm}^2$ の時、セル電圧 1.582V において、 91.4% のエネルギー変換効率を得られている。

また、触媒種は二酸化イリジウムと二酸化ルテニウムの混合酸化物が優れていること、さらに、電解温度を 120°C とすると、 80°C に比べエネルギー変換効率が向上すること、が明らかとなった。

③ラボセル試験の内容

上記の4方式については、各提案企業は、平成5～8年度の期間において電極面積が 50cm^2 及び 200cm^2 のラボセル試験に取り組んできた。方式の絞り込みについて記述する前に、それらの試験の具体的内容について以下に簡略に記述しておく。

・ 50cm^2 ラボセル試験

小型ラボセルによる高電流密度下でのセルの性能・耐久性向上のための要素技術を開発するため、ベンチスケールへのスケールアップに適する技術の絞り込みを行った。各技術の比較を公平にするため、性能評価試験は、

工業技術院大阪工業技術研究所に設置した共通評価設備を使用して実施した。

・ 200cm²ラボセル試験

50cm²小型ラボセル試験で得られた成果に基づき製作した4方式各々の200cm²中型ラボセルでの性能試験を実施し、スケールアップに際する問題点を把握するよう努めた。

④方式の絞り込み

これらの4方式について、工業技術院大阪工業技術研究所でセルの共通性能試験を実施したところ、表3.3-1の結果が得られた。さらに、委託先である（財）エンジニアリング振興協会に設置された中立な学識経験者で構成される委員会において、各提案企業からのヒアリング等を実施した上での厳密な評価作業を行い、平成9年度以降に予定されているベンチスケールプラントの製作・評価に進むべき技術の絞り込みを行った。なお、本絞り込みの基本的考え方は以下の2点である。

- (a)これまでの研究重点項目である電極面積50cm²セルでの性能向上のための要素技術開発の成果を中心に、今後の課題となる耐久性向上及び大型化に対する考え方を加味し、総合的な評価をする。
- (b)絞り込む方式の数は長期プロジェクトとしての開発リスクの回避という観点から1方式とせず、選択の余地を残すため2方式とする。

委員会において、4方式について点数による評価を行ったところ、表3.3-2に示す結果となった。

表 3.3-1 セルの特性 (80℃、大気圧、膜厚50 μ m、電極面積50cm²)

	電 流 密 度 (A/cm ²)	セル電圧 (V)	電 流 効 率 (%)	エネルギー変換 効 率 (%)
無電解メッキ法	1.0	1.561	96.9	91.8
	2.0	1.645	97.7	87.8
	3.0	1.717	97.5	84.1
ホットプレス法	1.0	1.550	99.6	95.1
	2.0	1.629	99.7	90.7
	3.0	1.694	99.8	87.2
多孔質焼結体電極法	1.0	1.571	97.3	91.6
	2.0	1.659	97.7	87.2
	3.0	1.751	97.4	82.4
ゼロギャップ法	1.0	1.582	97.7	91.4
	2.0	1.664	98.3	87.4
	3.0	1.737	98.2	83.7

(注) エネルギー変換効率の定義:

電流密度 = (固体高分子電解質膜に印加した電流)/(電極面積)

セル電圧 = (電解セルに負荷されている電圧)

電流効率 = (電解に利用された電流)/(電解セルに負荷した電流)

= (発生ガス量)/(負荷電流に対応する理論発生ガス量)

エネルギー変換効率 = (理論電圧1.48V)/(セル電圧)x(電流効率)

表3.3-2 固体高分子電解質水電解法4方式に関する評価結果

方式	評点	総合評価
ホットプレス法	330	燃料電池の技術蓄積により、4方式中最も高い性能を実証。セル高性能化の諸要素を押さえて改善の効果を上げている。セルの耐久性も問題ないと考えられ、大型化への考え方もしっかりしている。
無電解メッキ法	314	従来製法の改良による新しい接合法(表面多孔質化)を開発し、高効率なセル製法を確立。セルの耐久性も問題ないと考えられる。大型化への考え方もしっかりしている。
セロキヤップ法	305	同方式としては高性能化が図られたが、触媒の耐久性に疑問。触媒使用量も多いことから大型化の際の経済性が問題となる。
多孔質焼結体電極法	240	膜と電極を一体化しない概念は評価できるが、高電流密度下での高性能運転には、なお開発の余地がある。触媒も溶出しやすいルテニウムを使用しているから、大型化の際の取扱いとセルの耐久性が問題となる。

(得点は、390点満点を基準とした値である。)

したがって、ベンチスケールプラントの開発のための電解法としては、無電解メッキ法とホットプレス法を選定することとなった。

なお、上記の絞り込みは電極面積50cm²セルでの性能向上のための要素技術開

発の成果を中心に行ったが、電極面積 200cm^2 セルを使用した際の結果によるスケールアップの感触を確認したところ、どの方式においても電極面積 50cm^2 の時とはほぼ同じ性能を得ることができた。

今後は、上記の結果に従い、無電解メッキ法及びホットプレス法の2方式について、 $2,500\text{cm}^2$ のベンチスケールプラントでの性能試験を実施する予定である。

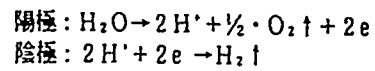
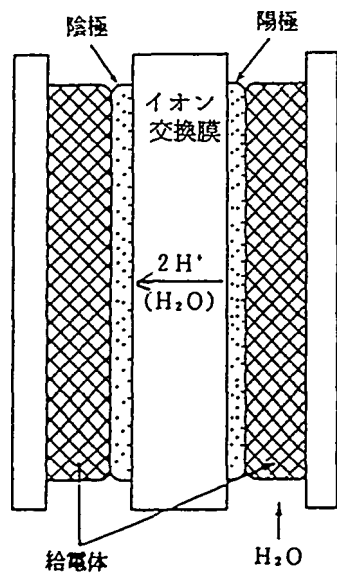


図 3.3 - 1 固体高分子水電解の原理図

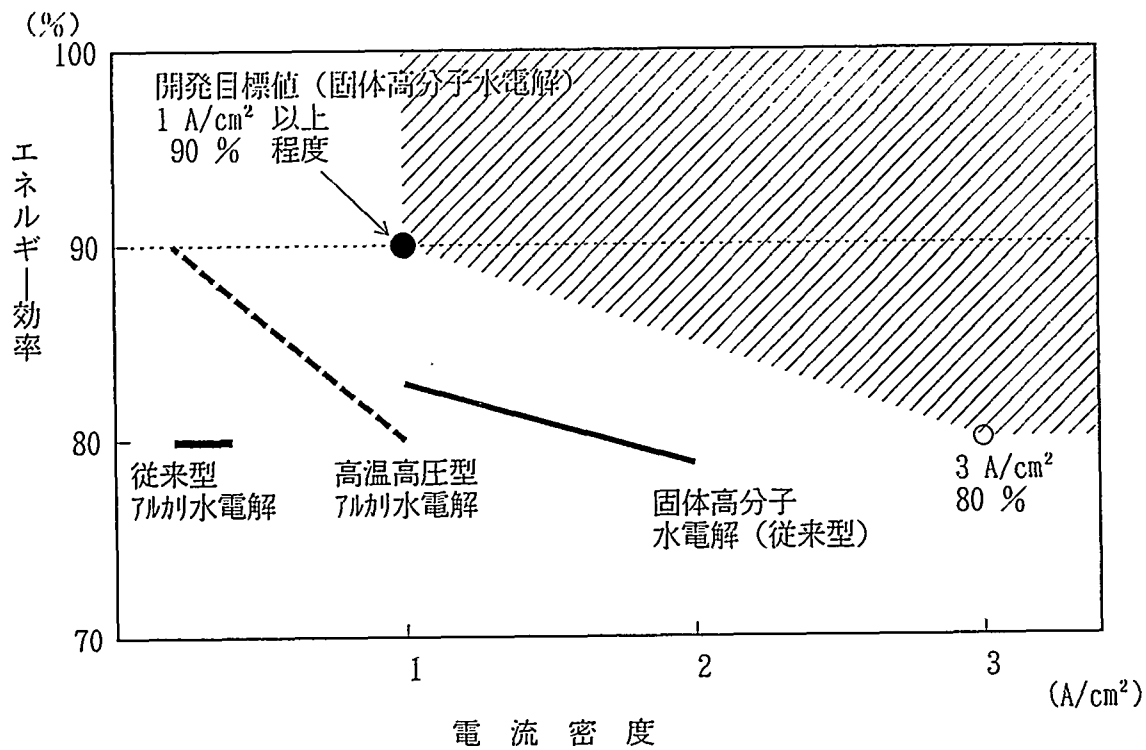


図 3.3-2 本プロジェクトでの開発目標と他方式との比較

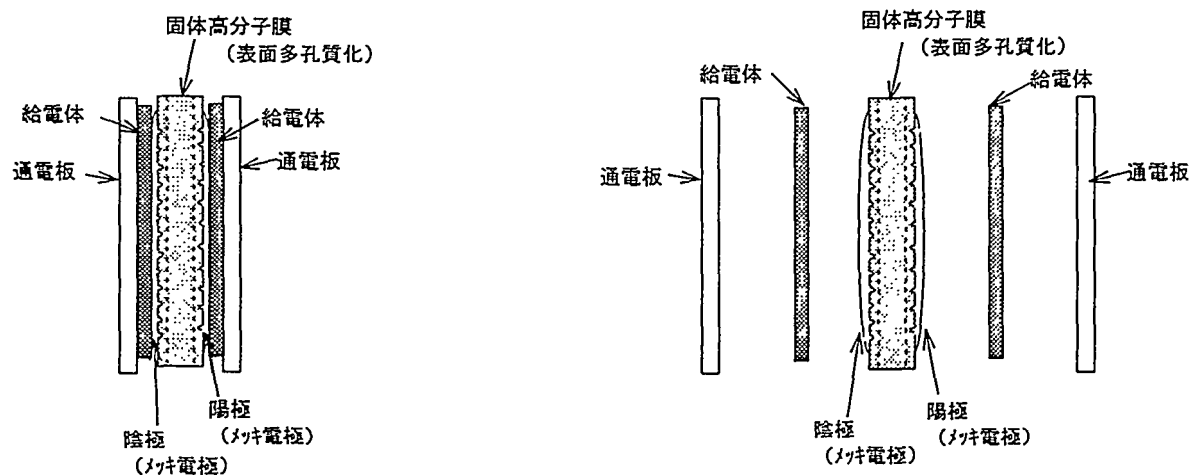


図 3.3-3 無電解メッキ法の電解セル概略図

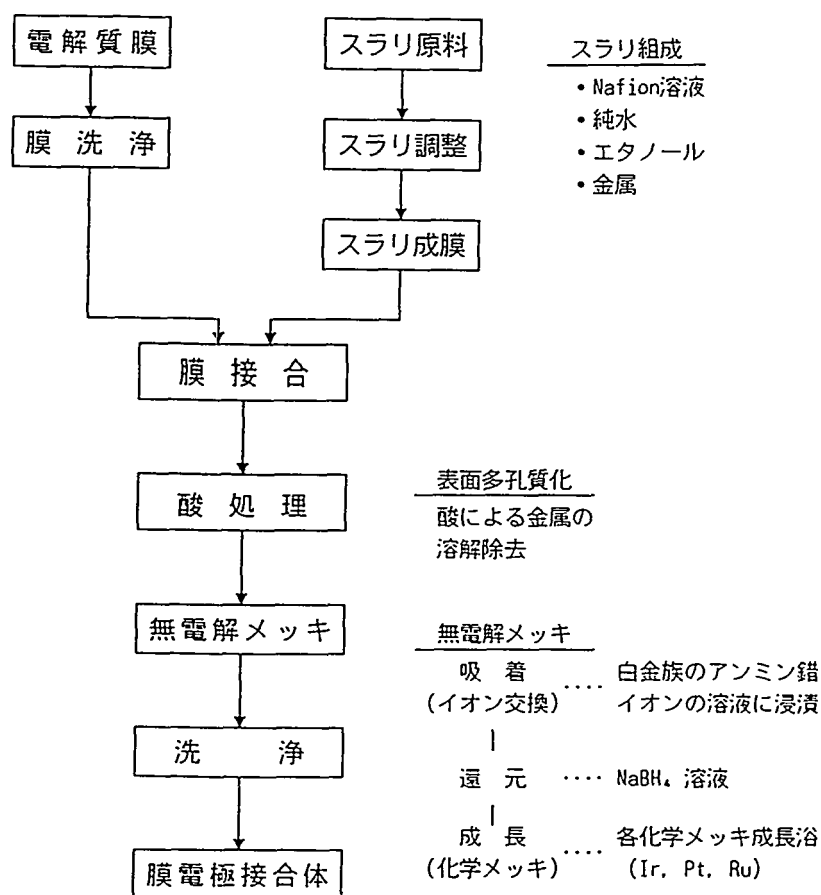


図 3.3 - 4 無電解メッキ法による膜電極接合体の製造工程

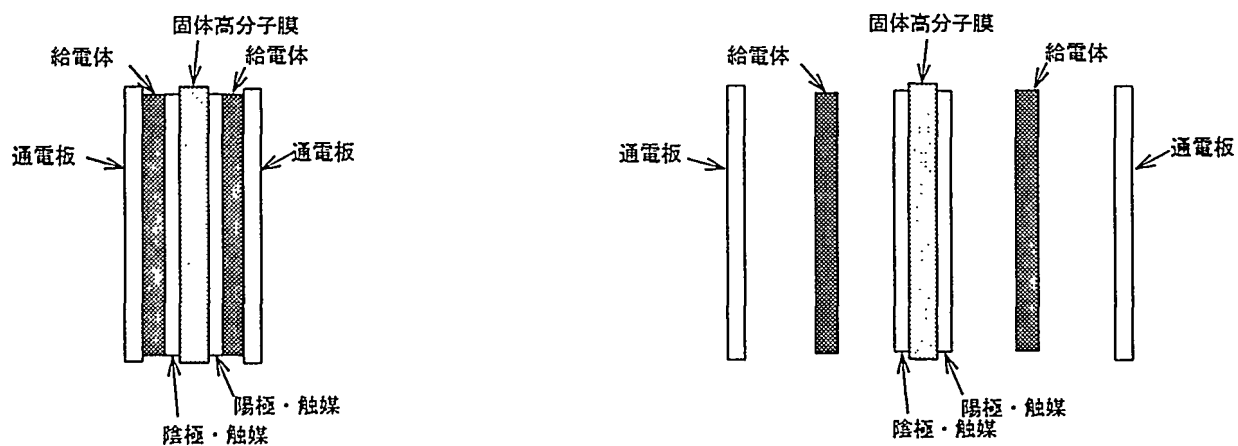


図 3.3-5 ホットプレス法による電解セル概略図

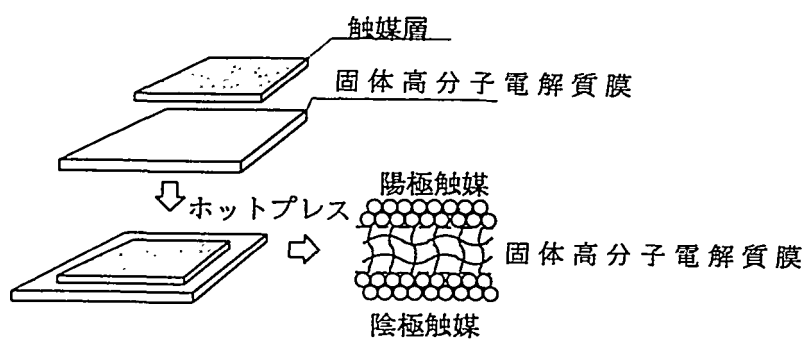


図 3.3 - 6 ホットプレス法による膜電極接合技術

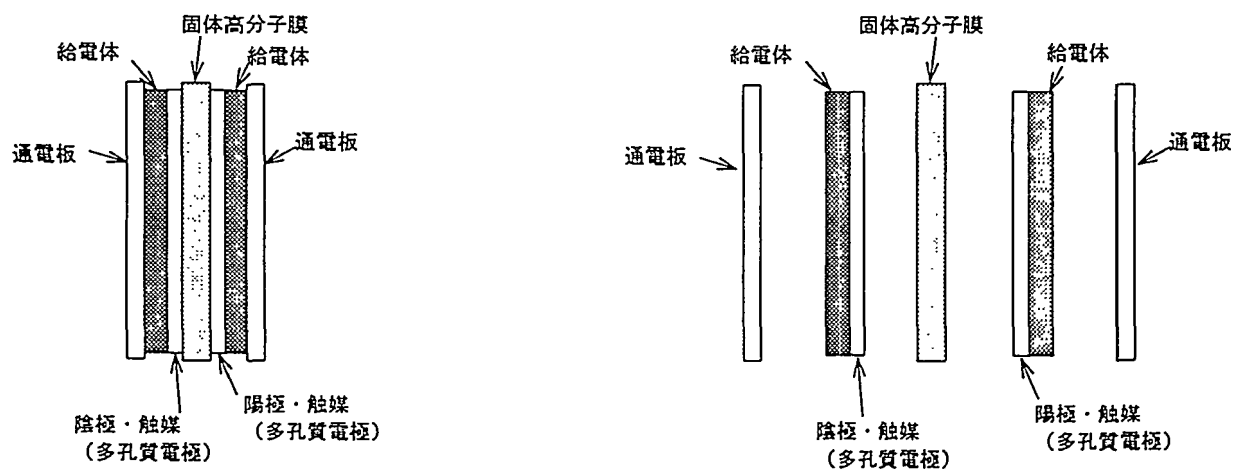


図 3.3-7 多孔質焼結体電極法による電解セル概略図

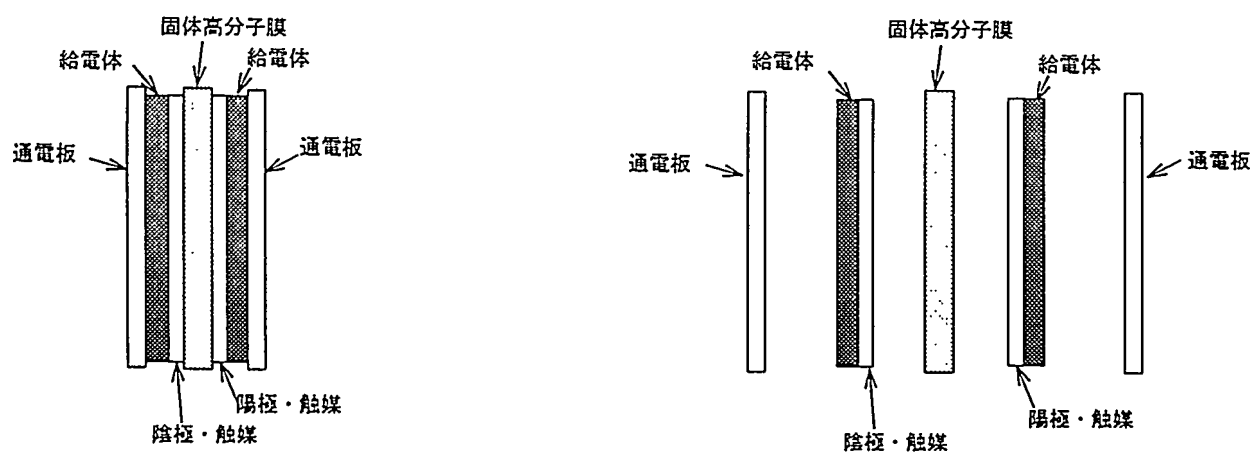


図 3.3-8 ゼロギャップ法による電解セル概略図

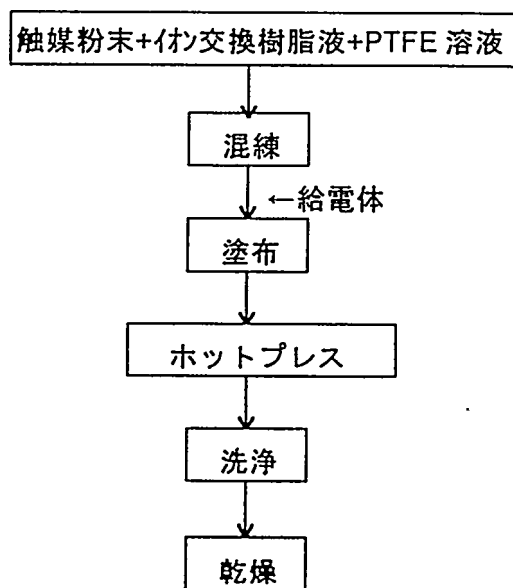


図 3.3 - 9 触媒作製のフロー

(2) 耐高温高分子電解質膜の開発

① 研究開発の位置づけ

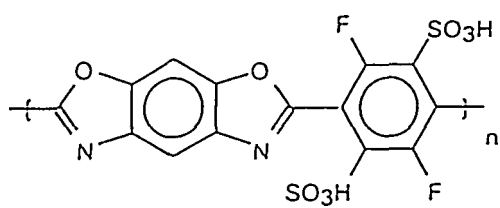
耐高温高分子電解質膜の開発は、長期的な課題として、現在の水電解温度よりも高温での水電解により、エネルギー変換効率の一層の向上をもたらす新しい電解質膜の開発を目指すものである。現在、(1)で開発している従来型の高分子電解質を使用している電解法では、電流密度 1 A/cm^2 のエネルギー変換効率が目標値 90% を超えるとの画期的成果が得られているが、W E - N E T の全体構想の実現のために必要と考えられる高電流密度では未だ 90% には達していない（電流密度 3 A/cm^2 では 87.2% が最高）。すなわち、今後、水電解法においては高電流密度におけるエネルギー変換効率の一層の向上を目指していくことが必要になるものと考えられる。

したがって、将来的に、本プロジェクトの第 I 期の目標値を超えた大電流密度・高エネルギー変換効率を求めなければならなくなる可能性があるとするれば、高温での水電解は検討に値するテーマであり、現時点から基礎研究に取り組むことは有意義である。このため、第 I 期においては、現在実用化されていない新しい耐高温高分子電解質膜の開発に必要な基礎研究に取り組むこととした。

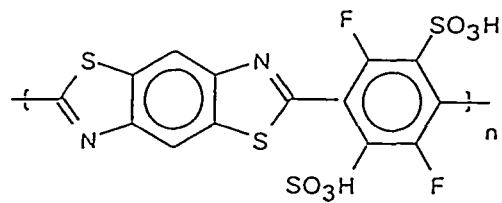
② 開発内容と進捗状況

(1)で開発中の電解セルで使用されている Nafion など既存のフッ素系高分子膜の運転温度の上限は、長期実用運転に対して $100\sim 120^\circ\text{C}$ とされている。このため、耐熱性及びイオン伝導度に優れた膜の開発を進めることとした。現在までに、いくつかの新しい高分子膜の候補を化学合成し、それらの熱安定性と電気伝導度の測定を行った。合成した高分子の代表的な化学構造を図 3.3-10 に示す。従来型の固体高分子電解質の構造が直鎖上をスルホン基が置換しているのに比べ、本化合物は骨格構造が芳香環を有するという特徴がある。

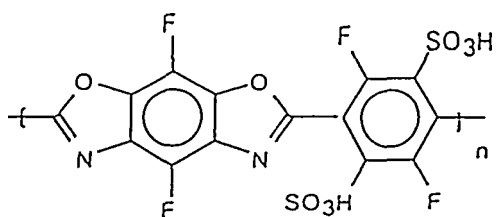
これらの電解質膜を熱安定性を熱天秤により測定した結果、 450°C まで熱的に安定であることが判明した。しかしながら、これまでに得られている電気伝導度の最高値は、室温で 29 mS/cm であり、今後は高温下における電気伝導度等の測定を行い、電解質膜の高性能化を図っていく予定である。



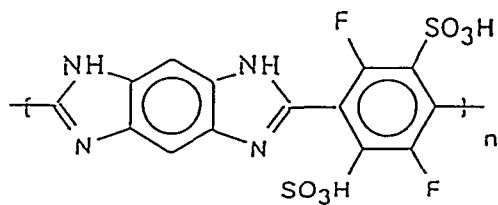
(1)



(2)



(3)



(4)

図 3.3 - 10 耐高温高分子電解質

— 合成した高分子電解質の化学構造 —

3. 4 水素輸送・貯蔵技術

再生可能エネルギーの輸送・貯蔵媒体として有力な液体水素は、現状では宇宙ロケット用燃料や一部の化学原料などの限定された用途に使われているのみであり、W E - N E Tの全体構想で想定されている大量輸送・貯蔵技術は現時点では存在しない。類似技術としては液化天然ガス(LNG)の輸送・貯蔵技術が存在するが、液体水素は沸点が低く(20K)、また、水素脆化を引き起こす等の点から材料の満たすべき条件が過酷であり、液化天然ガス(LNG)の輸送・貯蔵技術をそのまま転用することはできない。他方、水素の分散貯蔵・輸送手段として期待される水素吸蔵合金については、種々の用途に応じた性能を満たすための大幅な技術革新が必要となっている。

このため、本プロジェクトにおいては、液体水素の大量輸送・貯蔵技術及び水素吸蔵合金の開発に取り組むこととしている。第Ⅰ期においては、これらについての技術開発課題を抽出するとともに、液体水素を用いた全体システムのコスト試算の検討にも供する概念設計を行うこととしている。このため、平成5～8年度においては、以下の項目につき調査を主体とする研究を実施した。

(液体水素の大量輸送・貯蔵技術)

- ・大型水素液化設備の概念設計(液化プロセスの検討)
- ・液体水素輸送タンカーの概念設計(断熱構造の検討)
- ・液体水素貯蔵設備の概念設計及び断熱試験計画の策定
- ・各種共通機器の技術課題抽出及び要素試験計画(液体水素ポンプ)の策定
- ・低温材料の特性試験(低温脆性試験及び水素脆性試験)

(水素吸蔵合金技術)

- ・分散輸送・貯蔵用水素吸蔵合金の適用性検討及び調査

3. 4. 1 大量輸送・貯蔵技術

(1)大型水素液化設備の開発

実用規模の水素燃焼タービン発電所の規模を1000MW(500MW×2基)と仮定する

と、必要な液体水素の量は約1200ton/dayとなる（水素の熱量：142kJ/g、1J＝ 2.7×10^{-7} kWh、発電端効率＝60%として算出）。現在実用化されている最大の液化設備容量は30ton/dayであり、スケールアップによる圧縮機の効率向上、熱交換機等の構成機器の実現性の点から、単機当たりの容量を現状規模の10倍の300ton/dayとした。したがって、水素液化プラントは4基の液化設備で構成される。なお、現状の液化設備のプロセス効率は30%程度と低く、改善の必要がある。以上のことから、大型、高効率な液化設備の開発に取り組む必要がある。

具体的には、液化のプロセス効率を向上させるために、既存の液化技術の改良の方策を検討するとともに、各種の新しいプロセスを考案し、システム系統、プロセス効率等に関する机上検討によって、これらの比較を行った。水素液化の基本プロセスは、圧縮→冷却→膨張→液化のフローである（図3.4-1）。膨張工程では、ジュール・トムソン効果がもたらす断熱絞り膨張と膨張タービンによる等エントロピー膨張により、水素が液化される。現状の液化プロセスでは膨張タービンで発生する動力は回収されず、最終的には熱として系外に散逸されているが、液化設備の大型化に当たっては、最終段の膨張タービンで動力回収を行い、プロセス効率の向上を図った。

各種液化プロセスは、異なる冷媒を用いる点で冷却方式が異なる。冷媒の沸点が低く、分子量が大きい方がプロセス効率が高くなるが、一般にはこの2つはトレードオフの関係にある。したがって、各種冷媒の使用によるプロセス効率の差に留意しつつ、以下の液化プロセスに関する机上検討を行った。また、これらの液化設備の大型化に当たっての技術開発課題の抽出を行った。

(a) 各種液化プロセスの検討

① 水素クロードサイクル

クロードサイクルとは、ジュール・トムソン効果と等エントロピー膨張の組み合わせによる高圧気体の膨張により、寒冷を発生させ液化させるものである。水素を冷媒として使用するとガスが1種類であるため、システムがシンプルになる。このサイクルは現在、水素液化設備の実用プラントに適用されている。本プロジェクトにおいては、膨張タービンによる動力回収、システム系統の改良（多段化等）、大型化に伴うコンプレッサーの効率向上等によ

り、計算上はプロセス効率が向上する(42%)ことが判明した。なお、本サイクルは液化の対象と冷媒が一致しているので、冷媒の調達が容易であるという利点を有する。

② 混合冷媒サイクル

水素クロードサイクルの改良型であり、冷媒に分子量の大きい炭化水素を混合させて、密度を高めている。本プロセスは水素クロードサイクルに比較し、プロセス効率が計算上若干低下する(42%→40%)。また、炭化水素は沸点が低く、最終段で凍結するので、冷媒中の水素と炭化水素を最終段で分離する必要がある。

③ ヘリウムブレイトンサイクル

ブレイトンサイクルの冷媒にヘリウムを用い、等エントロピ膨張により寒冷を発生させ液化させる方法。水素クロードサイクルとともに、現在水素液化設備に実用化されている。ヘリウムは水素に比較し、沸点が低く、分子量が大きいため冷媒に適している。本プロジェクトでは、膨張タービンによる動力回収、システムシステムの改良等に関する机上検討の結果、プロセス効率が45%に向上することが判明した。

④ ネオンブレイトンサイクル

ヘリウムブレイトンサイクルの改良型であり、冷媒にネオンを用いたものである。ネオンはヘリウムより分子量が大きく、より高い効率を狙うことも可能である。結果的には、プロセス効率は1%程向上したが、自然界における存在量が少なく、コストが高いという難点がある。

⑤ ネリウムブレイトンサイクル

ヘリウムブレイトンサイクルの改良型であり、冷媒にヘリウムとネオンの混合体であるネリウムを用いたもの。プロセス効率はヘリウムブレイトンサイクルと同程度であったが、冷媒コスト等を考慮すると総合評価は低くなる。

表3.4-1に水素液化プロセスの比較を示す。

表 3.4-1 水素液化プロセスの比較

サイクル	水素 クロード	混合冷媒	ヘリウム ブレイトン	ネオン ブレイトン	ネリウム ブレイトン
冷媒	H ₂	H ₂ , H C	H e	N e	N e, H e
分子量	2	—	4	20	—
効率	42%	40%	45%	46%	45%

(検討条件)

液化量 : 300ton/day

原料水素圧力 : 1.05atm

液体窒素の原単位 : 0.5kWh/Nm³

膨張タービンの断熱効率 : 85%

圧縮機断熱効率 : 80%

プロセス効率 = 必要最小仕事 / 投入動力 × 100

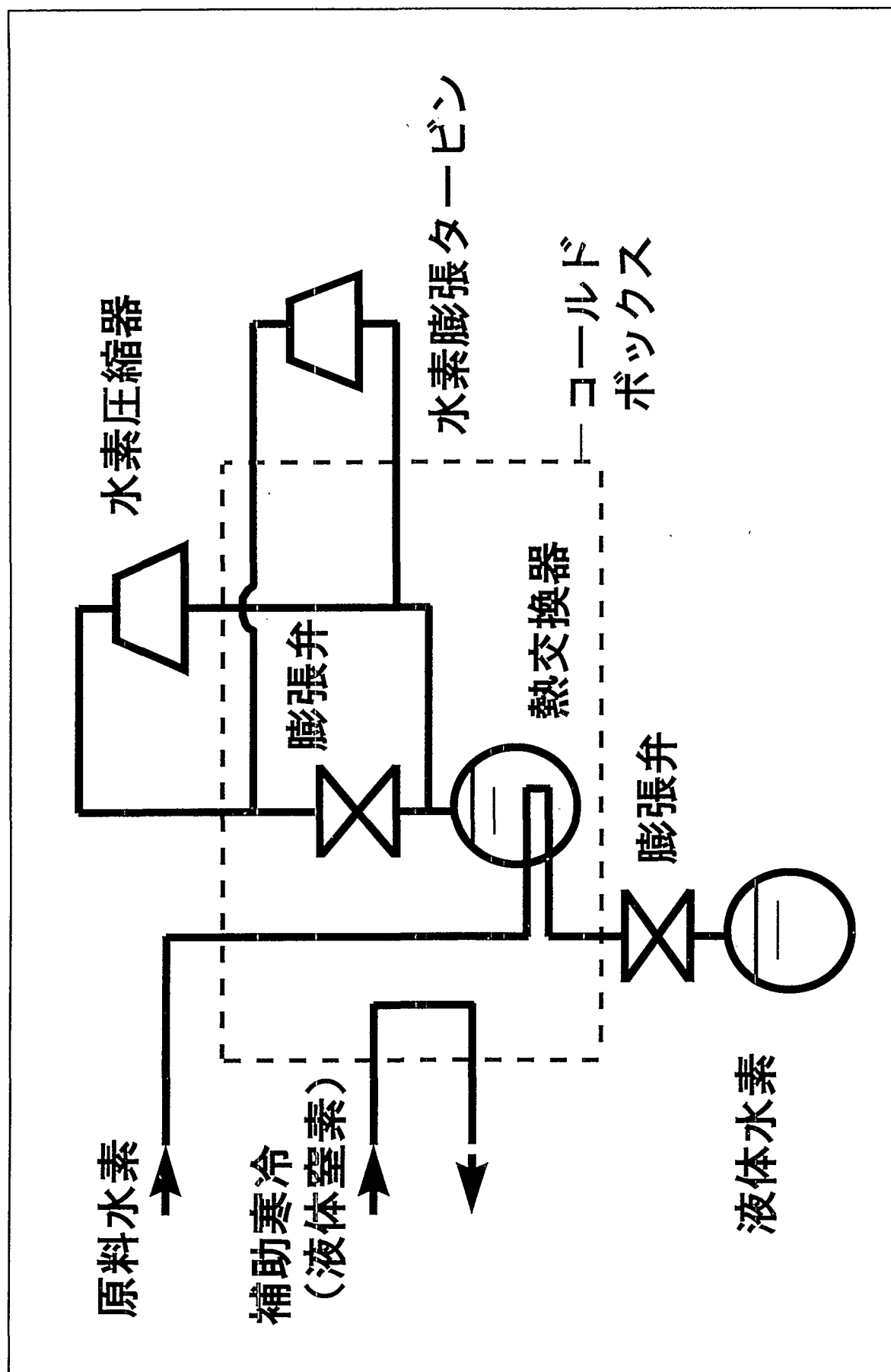
(注) 膨張タービン、熱交換機への進入熱及び膨張タービンでの圧力損失については考慮していない。

(b) サイクルの絞り込みと技術開発課題の抽出

上記 5 方式に関する比較・検討を行った結果として、プロセス効率、経済性等の点から、平成 8 年度までに水素クロード及びヘリウムブレイトンの 2 つのサイクルに絞り込んだ。今後は、残された第 I 期計画中に、2 つのサイクルをさらに運転性、経済性、構成機器等の観点から詳細に検討し、第 II 期計画における研究開発の対象設備のサイクルとして一方式に絞り込む予定である。

また、試設計の結果、水素膨張タービンの構成機器を今後の技術開発課題として抽出した。今後は、水素膨張タービンの構成機器の要素試験を行い、第 II 期での研究開発に向けた準備を行う予定である。

図 3.4-1 水素液化化基本プロセス



(2)液体水素タンカーの開発

水素の大量輸送にはタンカーなどの船舶による海上輸送が適していると考えられる。しかし、現状では液体水素を大量に輸送することができるタンカーは存在しない。このため、大型の液体水素タンカーの実現に必要な技術開発課題を抽出するとの観点から、その基本仕様、断熱構造について検討した。タンカーの容量は、1000MW級の水素燃焼タービン発電所(500MW×2基)への水素供給を想定して決定した。なお、基本仕様については、現在、既に実用化されているLNGタンカーを参考とした。

表 3.4-2、液体水素及びLNGの基本物性値比較

	液体水素	LNG(メタン)	備考
沸点(K)	20	112	
比重(kg/m ³)	71	424	
蒸発潜熱(kJ/kg)	447	510	
蒸発潜熱(kJ/Nm ³)	31600	216200	
爆発範囲(%)	4～76	5～15	空気中
最小発火エネルギー(mJ)	0.02	0.28	
発熱量(kJ/Nm ³)	12750	45790	高位発熱量
発熱量(kJ/g)	142	56	高位発熱量

①タンカーの基本仕様の検討

液体水素タンカーの基本仕様を以下のとおり定めた。

(a)容量：200,000m³

500MWの水素燃焼タービン2基を有する発電所を想定すると、液体水素の使用量は1200ton/dayとなる(3.4.1(1)参照)。航海日数を往復20日とし2隻で10日毎に荷揚げすれば、1隻では1200×10=12000tになる。運送時の損失等を考慮して、輸送量を14000tとした。したがって容量は14000/0.07(比重)=200,000m³となる。

(b)航海日数：20日

速度20～25ノット；37～46km/h相当、距離11,000kmと仮定した。

(C) BOR : 0.2～0.4%/day

Boil off Rate(BOR)の値は所要推進燃料の20～40%を蒸発した水素ガスで賄うとして決定した。

(d)貯蔵圧力 : 0.25kgf/cm²G

(e)タンク型式 : 球型及び角型

タンク支持構造が異なっており、球型は金属のスカート構造で支持され、角型は、木製の支持台に設置される。球型タンクは、現在LNG船で多く採用されている形式で、耐圧性に優れるが、タンク曲面加工等の困難さがある。一方角形は、平面構造主体であり、タンクの熱収縮を拘束しない支持台方式なので液体水素下での熱変形に対しても問題がない。なお、タンクの材質としては低温脆性、タンク重量低減の点からアルミ合金として検討を行った。

(f)船体構造 : 単胴船及び双胴船について検討を実施中。

単胴船はLNGで採用されている方式だが、液体水素は比重がLNGの1/6程度であり、安定性と推進性能の点から水素の場合は双胴船の方が適していると考えられる。

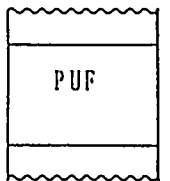
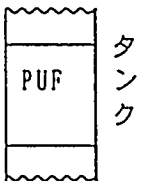
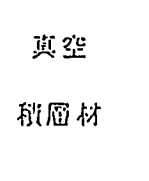
②断熱構造の検討とその結果

上記の基本仕様を基に、液体水素タンカーの断熱構造の検討を行った。その結果を表3.4-3に示す。机上検討上は、各々の断熱構造において目標性能が得られるとの結果が得られた。また液体水素の場合、LNGに比較し約10倍の断熱性能が必要なこと、水素が漏洩しやすいこと、また断熱材中のガスが液体水素温度では凍結してしまうことから断熱材の要素試験が不可欠であることが判明した。

今後は、液体水素タンカーの構造について詳細な検討を進めていく。なお、タンカーのタンク形式及び船体構造については、将来的に複数の方式が併存することも有り得るので、第I期においては特に方式を絞り込む予定はない。

また、技術開発課題として断熱材の性能の向上が抽出されたので、後述する大型断熱性能試験装置を用いて、タンカー用断熱材の断熱特性試験を行う予定である。

表 3.4-3 候補断熱構造の断熱性能試計算結果と課題

真空／非真空		ホールド常圧方式				ホールド真空方式			
断熱材		極厚 PUF	真空パネル A		真空パネル B		PUF		S. I
断熱構造									
試計算に使用した熱伝導率 (参考値)		0.023W/mK (at 200K) (継手部影響含まず)	0.00756W/mK (at 2×10^{-2} Torr) (継手部影響含まず)		0.0116W/mK (at 10^{-2} Torr) (継手部影響含む)		0.023W/mK (at 200K) (継手部影響含まず)		4.4 $\times 10^{-5}$ W/mK (at 10^{-4} Torr)
断熱厚さ		1 0 0 0 mm 以上	3 0 0 mm	5 0 0 mm	3 0 0 mm	5 0 0 mm	3 0 0 mm	5 0 0 mm	(10^{-4} Torr) (10 $^{-3}$ Torr)
BOR (%)		0.3	0.33	0.21	0.4	0.26	0.37	0.27	0.09 0.39
技術的課題	ガスの凍結	○	○		○				
	継手部熱対流	○	○		○				
	継手部熱伝導		○		○				
	真空の維持		○ パネル内部		○ パネル内部		○ ホールド内脱ガス		○ ホールド内脱ガス
その他技術的課題		PUFの-253℃での構造安定性。 タンクへの取り付け法 液化窒素の処理 凍結窒素対策	パネル間の気密性 タンクへの取り付け法 液化窒素の処理 凍結窒素対策		パネル間の気密性 タンクへの取り付け法 液化窒素の処理 凍結窒素対策		真空リーク時の安全性 タンクへの取り付け法 船体 (カバー) の気密性		真空リーク時の安全性 タンクおよびカバーへの取り付け法 船体 (カバー) の気密性

注) (○) : 技術検討を必要とする項目

(3) 液体水素貯蔵設備の開発

大型液体水素貯蔵設備を将来構築していくための方向付けをするため、現状のLNG用などの各種貯蔵設備の調査を行い、それらの結果を基に液体水素貯蔵設備の概念設計を行った。また、液体水素の断熱特性に関する調査を行い、断熱性能試験の必要性を明らかにした。

① 各種の貯蔵設備に関する調査

大型液体水素貯蔵設備の全体システム（液体水素貯蔵基地のイメージ）を検討する際には、現状のLNG貯蔵システム等が類似技術として参考になる。このため、現状のLNG貯蔵システムをはじめとした各種貯蔵設備の調査を実施した。

(a) LNG貯蔵設備の調査

LNG貯蔵設備の現状を調査し、国内の代表的なLNG基地について、全体システム、構成機器及び貯蔵ユニットに関する情報を入手した。

(b) 既存の液体水素貯蔵設備の調査

大型の液体水素貯蔵設備について、国内企業に対するアンケート及び文献調査を実施した。その結果、国内では宇宙開発事業団種子島宇宙センターの540m³、海外では米国NASAのケネディ宇宙センターの3,218m³が最大であることが明らかとなった。また現在用いられている断熱構造は、バークライト真空断熱と積層真空断熱があり、大型貯槽ではバークライト真空断熱が採用されていることが判明した。

(c) 地下式貯蔵タンクの周辺技術の調査

地下式貯蔵は耐震性に優れ、漏洩に対し安全なため、液体水素の大量貯蔵に適していると考えられる。このため、地下式貯蔵タンクに関する文献調査を行った。その結果、地下式貯蔵に関する極低温域のデータはなく、コンクリートの極低温試験、凍結土対策を検討する必要があることが明らかになった。これらの結果を基に構成材料、周辺地盤条件、断熱性能等について設計条件を検討し、現在、50,000m³の液体水素地下式タンクの概念設計を行っているところである。

(d) 岩盤貯蔵タンクの調査

岩盤貯蔵は、岩盤空洞の力学的安定性、遮蔽性、岩盤内空洞の利用による経済性が期待される。このため、低温液化ガスの岩盤貯蔵の文献調査を実施した。その結果、LPGについては既に実用化され、LNGについては実験が行われているが、それらの液化ガス以下の温度（ -180°C ）以下の研究はほとんど行われていないことが明らかとなった。液体水素に岩盤貯蔵を用いた場合、岩盤に含まれる水分が凍結し、岩盤にクラックが生じる可能性がある。また、日本には適当な岩盤が存在しないこともあり、岩盤貯蔵方式は不適との結論が得られた。

(e) 保安技術及び関連法制度の調査

液体水素の貯蔵に関して下記の項目について調査を行い、その現状と課題を示した。

- ・ 国内の液体水素貯蔵に関する保安技術
- ・ 液体水素貯蔵に関する現状法規制
- ・ 類似液化ガス大型貯蔵設備における保安対策
- ・ 液体水素貯蔵における保安対策

上記の結果を踏まえ、貯蔵容量 $250,000\text{m}^3$ 規模の貯蔵基地について、液化設備、発電設備、及びタンカーとのインターフェイス条件と整合した貯蔵設備全体システムの机上検討を実施した。今後は更に詳細な検討を行うこととしている。

② 貯蔵設備用の断熱構造に関する調査

大型液体水素貯蔵設備を開発するためには、液体水素下の極低温に耐える断熱構造に関する検討が不可欠であるため、内外に存在する貯蔵設備の断熱構造の現状調査を中心とする技術的検討を行った。

(a) 断熱材・断熱構造に関する文献調査

極低温における断熱材・断熱構造に関する文献調査を行った。その結果、各種断熱方法の断熱材及び支持材の熱伝導率、機械的強度の 20K レベルの性能、断熱構造、支持構造等の一部について知見が得られた。

(b) 概念設計

下記の形式による断熱構造の概念設計を実施したところ、各形式とも構造的には成立し得るとの結果を得たが、具体的な断熱構造試験を実施し、各種のデータを蓄積していく必要がある。

- ・ 検討条件：内容積=250,000m³，圧力=0.2kgf/cm²G，BOR=0.1%/day

- ・ 形式：粉末真空断熱による平底円筒貯槽及び球形貯槽

粉末常圧断熱による平底円筒貯槽及び球形貯槽

固体真空断熱による平底円筒貯槽及び横置円筒貯槽

積層真空断熱及び粉末真空断熱のメンブレン形式貯槽

(c) 断熱構造試験装置の調査

大型断熱性能試験装置及び極低温用材料強度試験装置の2種類について、国内調査を実施した。

- ・ 大型断熱性能試験装置については、上記の形式を評価するために必要な仕様（試験体：直径約1mのディスク型、低温面：20K等）を満足する装置は現時点では国内には存在しないことが明らかになった。
- ・ 極低温用材料強度試験装置については、試験温度20K以下の強度試験を行えるのは、国内では10カ所以下であり、最大荷重は10トンである。また、液体水素下での試験装置は小規模なものが1カ所にしかなく、ある程度の大きさに対応できる試験装置は存在しないことが明らかになった。

今後は、断熱方法を含めた詳細な構造・経済性等について、今後引き続き検討する必要がある。特に、断熱構造については、液体水素下での断熱材の特性データを蓄積していくため、大型断熱性能試験装置を製作し、液体水素下での試験を実施する予定である。極低温用材料強度試験については、「(5) 低温材料技術の開発」において別途設置する液体水素雰囲気下材料試験装置を利用して特性試験を行う予定である。

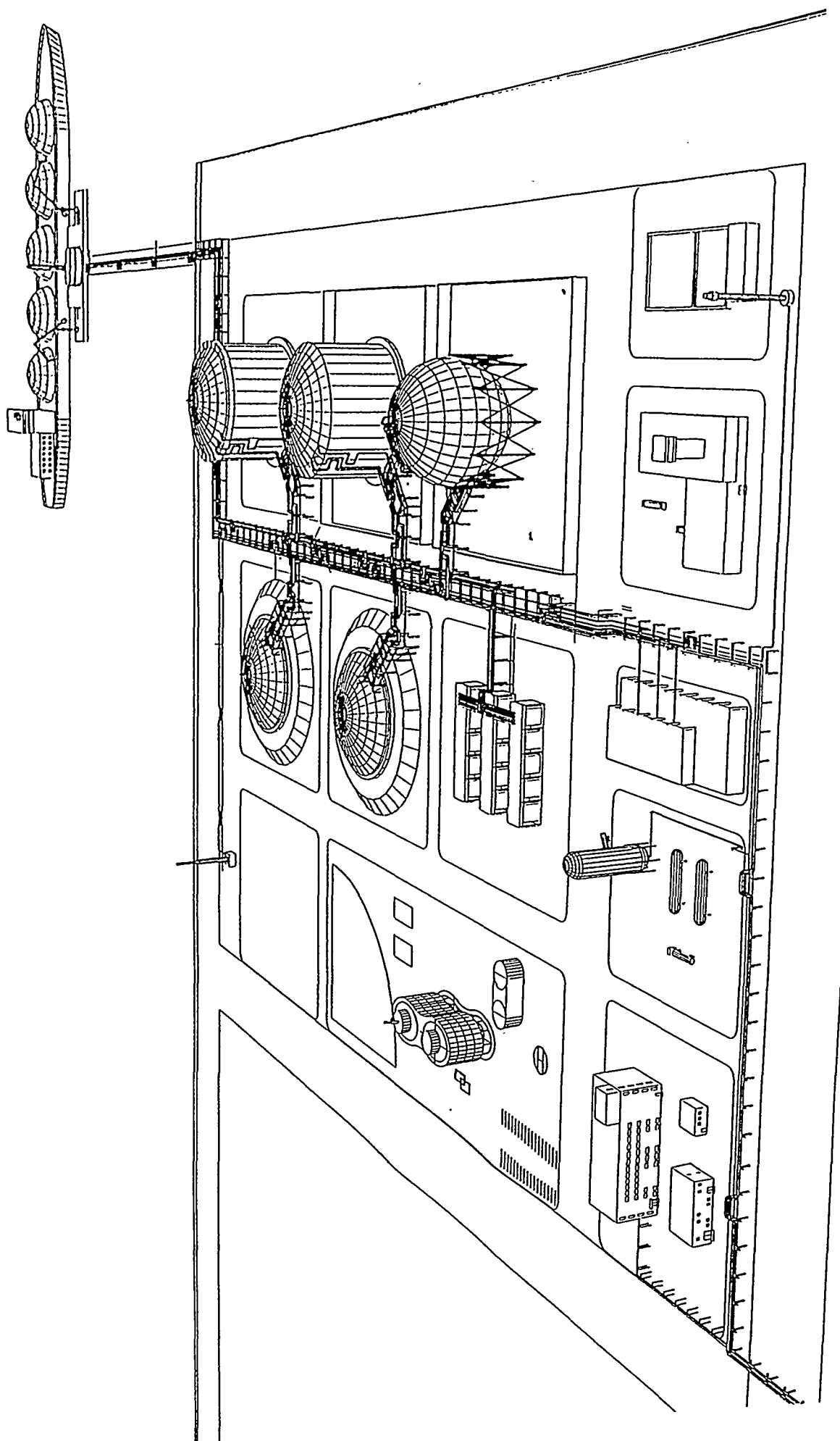


図 3.4-2 液体水素貯蔵基地レイアウト例

(4) 各種共通機器の開発

液体水素関連設備（水素燃焼タービン、水素液化設備、水素貯蔵装置等）における各種共通機器について試設計を行い、基本仕様の検討及び技術開発課題の抽出を行っている。これらについて現状技術を調査したところ、適当な技術が存在せず、また存在しても仕様、耐久性等の点で問題があることが判明した。

① 大型液体水素ポンプ

液体水素ポンプとしては、宇宙ロケットエンジン用ポンプが既に実用化されているが、長期間の使用条件においては耐久性等の問題が予想される。

WE-NETの全体構想で想定される液体水素関連設備においては、下記に示す3種類のポンプが必要であると考えられる。

表 3.4-4 各種液体水素ポンプの仕様

	大容量型	中容量型	高揚程型
揚程 (m)	256	256	8,530
流量 (m ³ /hr)	10,000	1,000	90
回転数 (rpm)	7,200	7,200	3,600

以下に本プロジェクトで必要な大型液体水素ポンプの要求項目を示す。

(a) 高回転の要求

液体水素の比重は0.071と小さく、ポンプのモーター軸の回転速度を他の流体のときに比べ、大きくしなければならない。ポンプ効率は回転比速度に依存し、回転数を上げずに揚程を上げた場合、回転比速度が大きく低下してポンプ効率が悪化する。このため、ポンプ効率を保ちつつ高揚程を要求される液体水素ポンプでは回転数を上げておく必要がある。例えば、水ポンプでは通常3600rpm以下の回転数が採られているのに対して、水素ポンプでは7200rpm程度の高回転数が必要になる。

(b) 大馬力の要求

ポンプの馬力は体積、圧力、効率の積で決定されるが、液体水素は低密度であるために、同じ重量流量に対し大馬力が必要になる。例えば液体水

素の密度は水の密度の1/14であり、同じ吐出圧力を出すためには逆に14倍高い揚程が必要になる。

(c)高効率、高断熱の要求

液体が極低温であるので、熱の発生、進入に対し流体が蒸発しやすく、高効率、高断熱が要求される。

(d)耐極低温の要求

液体水素の沸点は極低温（20K）であるため、使用材料が限られる。

概念設計の結果、大型液体水素ポンプについては、技術開発課題が抽出され、例えば極低温部における軸受け部の耐久性等について現状の液体水素ポンプでは対応が困難であるとの結論を得た。

②大口径真空断熱配管

大型液体水素配管について試設計を行い、課題抽出を行った。液体水素は極低温であるために、熱収縮差が大きく又水素脆性のため使用材料に制限がある。特に大口径である場合、配管内の下半分が液体水素、上半分がガスに接触しているような場合の熱歪みの吸収が必要となる。また水素の分子径は小さいため、シール構造が問題となる。

上記の点を考慮しつつ、断熱構造、熱収縮構造、継手構造等の試設計を行い、配管の入熱特性等の基礎的条件を得た。

③液体水素弁

液体水素弁について実使用条件から基本仕様を明らかにし、技術課題の抽出を行った。液体水素弁の場合、その開閉に伴い温度変化が生じること、僅かな形状の歪みが漏れという重大不具合に直結する点にも注意する必要がある。この点を考慮し低温材料、バルブ流量特性、弁駆動機構、シール機構及び材料の各項目について、設計仕様、基礎試験の検討を行った。

なお、弁の形式としては開閉用、流量調整用毎に形式が異なるので、今後引き続き各々検討する必要がある。

④ 計装設備

液体水素を扱うために必要な計装設備について、タンク液位計、流量計及び漏洩検出器についての現状技術を調査し、技術開発課題の抽出を行った。

今後は、①～④の共通機器に関する概念設計を踏まえ、重要度、技術的課題の大きい大型液体水素ポンプの軸受け部の耐久性試験等を行う予定である。また、他の共通機器については、引き続き詳細検討を行う予定である。

(5) 低温材料技術の開発

液体水素貯蔵設備、液体水素輸送タンカー等で液体水素を扱うためには実作業条件、すなわち、液体水素温度又は極低温の水素ガス雰囲気下で使用可能な材料が必要である。しかしながら、現状では構造材料の耐久性等に関するデータが不足している。このため、既存材料についてデータを取得・蓄積するとともに、必要に応じ、既存材料の改良または新規材料開発を行う。さらに、液体水素条件で利用できる構造材料の適正溶接法を検討する。

① 低温材料に関する調査

文献調査を中心に従来データの収集・整理を行った。その結果、液体水素温度域での靱性、疲労等に関する材料データがほとんど無いことが判明した。また、液体水素温度領域で使用可能な材料は一般に溶接がしにくく、かつ溶接部の破壊抵抗が低下することが明らかとなった。また、液体水素の極低温（20K）領域で使用が可能と考えられる構造材料の候補としては、ステンレス鋼のSUS304L、SUS316L及びアルミ合金のA5083が挙げられた。

② 候補材料の特性試験

液体水素又は水素ガス雰囲気での材料評価を行うために液体ヘリウム下での低温脆化試験、水素脆化試験及び水素ガス雰囲気下での常温から低温（80K）における各種の材料強度試験を実施した。

(a) 試験片

SUS304L、SUS316L及びA5083の厚板材（25mm厚）を用いて溶接継手を作製し、母材及び溶接部より試験片を採取した。

溶接継手は、ステンレス鋼はTIG溶接、アルミ合金はMIG溶接で作製した。

TIG溶接：ガスシールド非消耗電極式アーク溶接法の1つ。不活性雰囲気中でタングステン電極と母材との間にアークを発生させて溶接させる。

MIG溶接：ガスシールド消耗電極式アーク溶接法の1つで、シールドガスとしてアルゴンなどの不活性ガスを用いる。

(b) 評価方法

- ・ 低温脆化試験：液体水素下(20K)で試験できる装置が国内に存在しなかつたため、液体ヘリウム温度(4K)で各種評価試験を実施した。
- ・ 水素脆化試験：高温(350℃)、高圧下(9MPa)で試験片に過剰な水素をチャージして室温、4Kで試験を実施した。
- ・ 水素ガス雰囲気試験：高圧(～10MPa)ガス中、常温～低温(80K)で試験を実施した。

引張特性、破壊靱性及び疲労特性について、表3.4-5に示すような条件で評価試験を実施した。

(c) 試験結果

試験結果をまとめて、表3.4-6及び表3.4-7に示す。また、図3.4-3にSUS304Lの水素ガス中での引張試験片の破面の例を示す。

これらの結果から、候補材の低温脆化及び水素脆化は、母材では特に劣化はないものの、溶接部については脆化感受性が高いことが判明した。

③液体水素雰囲気下材料試験装置の製作

平成8年度に、実使用条件下での材料評価が可能な、新しい試験機を設計、製作した。本装置は液体水素雰囲気下での引張試験、破壊靱性試験、疲労試験が一台で可能である。表3.4-8に試験装置の仕様、図3.4-4に試験装置の全体図を示す。

今後、この試験装置を用いて、液体水素雰囲気下での材料試験データを蓄積し、低温材料の評価を実施していく予定である。

表3.4-8 液体水素雰囲気下材料試験装置の仕様

項目	仕様
試験項目	引張試験、破壊靱性、疲労試験
試験温度	20 K (4 K, 77 K)
試験処理数	引張試験：6 本/Day、破壊靱性、疲労試験：1 本/Day
引張試験	荷重精度：±1.0%、ストローク：±50mm
破壊靱性	制御量：荷重、ストローク、伸び、開口変位
疲労試験	繰り返し回数：0.00001～30Hz、波形：サイン波、三角波、他
荷重装置	25ton油圧サーボ型

表 3.4-5 低温材料試験条件

試 験 項 目	試 験 条 件
引張試験 JIS Z-2241	①試験は基本的に J I S (極低温用) に準拠して実施。 ②試験片：丸棒試験片 (J I S 14号) を使用。板厚1/2から採取。 ③歪み速度：$2 \times 10^{-4} / s$ ④繰返し数：2 ⑤4Kおよび室温とも試験条件は同一とした。 ⑥溶接部は、溶接金属と継手部からそれぞれ試験片を採取。
シャルピー衝撃試験 JIS Z-2242	①試験は J I S に準拠して実施。自動試験機 (35kgf-m を使用) ②試験片：J I S 4号 (2mmVノッチ、10×10×55mm) ③母材、溶接部は板厚1/2から圧延直角方向に採取。 ④繰返し数：3、ノッチ位置：母材、溶接金属、熱影響部 ⑤4Kでの試験は、発砲スチロールの容器を使用。
破壊靱性試験 ASTM E-813	①試験は最新の A S T M 規格に準拠して実施。 ②試験片：0.5インチの C T 試験片、繰返し数：2 ③単一試験片によるコンプライアンス法で試験を実施。 ④破壊靱性は、J_{1c} から換算した K_{1c} で評価。
疲労試験 JIS Z-2273	①試験は J I S に準拠して実施。荷重制御。波形：正弦波 ②丸棒試験片で低サイクル疲労試験を実施。 ③周波数：0.17Hz、応力比：0.1 ④最大繰返し数：10^5 回 ⑤応力一定で、破断までの繰返し数で比較 ($10^3 \sim 10^5$) 。

表 3.4-6 候補材の試験結果（低温及び溶接脆化の評価）

特性名 材料名	位 置	引張強度 (MPa)		引張伸び (%)		シャルピー 衝撃値 (J)		破壊靱性 (K _{IC}) (MPa・m ^{-1/2})		疲労寿 命 (回)
		室 温	4K	室 温	4K	室 温	4K	室 温	4K	室温
SUS304L (Fe-18Cr-8Ni)	母 材	B (588)	◎ (1718)	B (70)	○ (36)	B (274)	○ (184)	B (>300)	◎ (287)	B
	溶接部 δ相：10%	◎ (620)	◎ (1568)	○ (52)	● (34)	○ (210)	● (21)	◎ (>300)	● (131)	◎
SUS316L (Fe-17Cr-12Ni-2Mo)	母 材	B (572)	◎ (1543)	B (59)	○ (45)	B (375)	○ (287)	B (>300)	◎ (>300)	B
	溶接部 δ相：10%	◎ (557)	◎ (1101)	◎ (56)	● (20)	○ (207)	● (34)	◎ (>300)	● (110)	◎
A5083 (Al-5Mg)	母 材	B (317)	◎ (575)	B (25)	◎ (26)	B (36)	○ (19)	B (56)	◎ (54)	B
	溶接部	◎ (301)	◎ (455)	◎ (24)	● (12)	○ (19)	● (6)	○ (49)	● (26)	◎

母材の室温のデータ(B)との比較
(脆化量)
◎：20%以下
○：20～50%
●：50%以上

():試験データ(平均値)

表 3.4-7 候補材の試験結果（水素脆化の評価）

		水 素 脆 化 感 受 性								
特性名 材料名	位 置	引張強度 (MPa)		引張伸び (%)		シャルピー 衝撃値 (J)		破壊靱性、 K _{IC} (MPa・m ^{-1/2})		疲労寿命 (H ₂ gas中) (回)
		室 温	4K	室 温	4K	室 温	4K	室 温	4K	室 温
SUS304L (Fe-18Cr-8Ni) H : 30ppm	母 材	◎ (615)	◎ (1741)	○ (46)	◎ (41)	◎ (278)	◎ (148)	◎ (312)	◎ (281)	○
	溶接部	◎ (667)	◎ (1663)	◎ (45)	○ (21)	◎ (187)	◎ (21)	○ (226)	○ (98)	○
SUS316L (Fe-17Cr-12Ni-2Mo) H : 30ppm	母 材	◎ (606)	◎ (1567)	◎ (68)	◎ (46)	◎ (345)	◎ (235)	◎ (>300)	◎ (>300)	◎
	溶接部	◎ (616)	◎ (1333)	◎ (50)	◎ (34)	● (91)	○ (18)	○ (169)	○ (80)	◎
A5083 (Al-5Mg) H : 1ppm	母 材	◎ (306)	◎ (578)	◎ (24)	◎ (25)	◎ (31)	— (14)	◎ (70)	◎ (43)	◎
	溶接部	◎ (296)	◎ (378)	◎ (26)	◎ (29)	◎ (38)	— (20)	◎ (71)	◎ (76)	◎

水素チャージ前後の比較
(水素脆化量)
◎ : 20%以下
○ : 20~50%
● : 50%以上
— : 脆化有無不明

(): 水素チャージ材の試験データ(平均値)

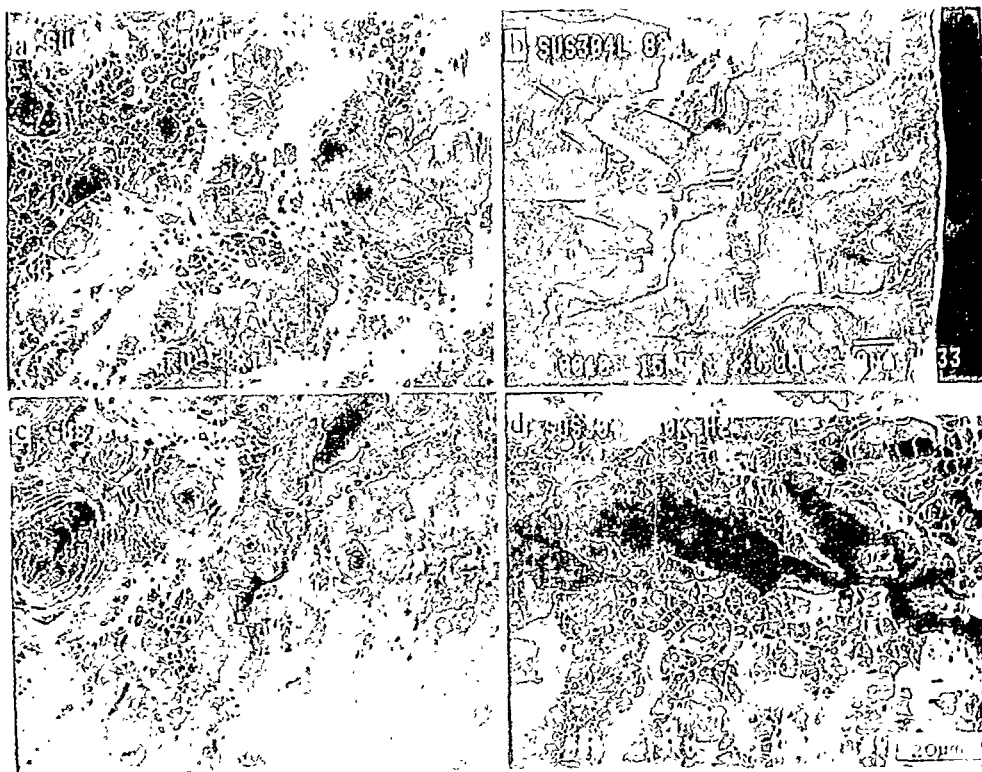


図 3.4-3 ステンレス鋼 (SUS304L) の 220 K 及び 80 K における
ヘリウムガス中及び水素ガス中の引張試験片破面

	ヘリウムガス中	水素ガス中
220 K	a	b
80 K	c	d

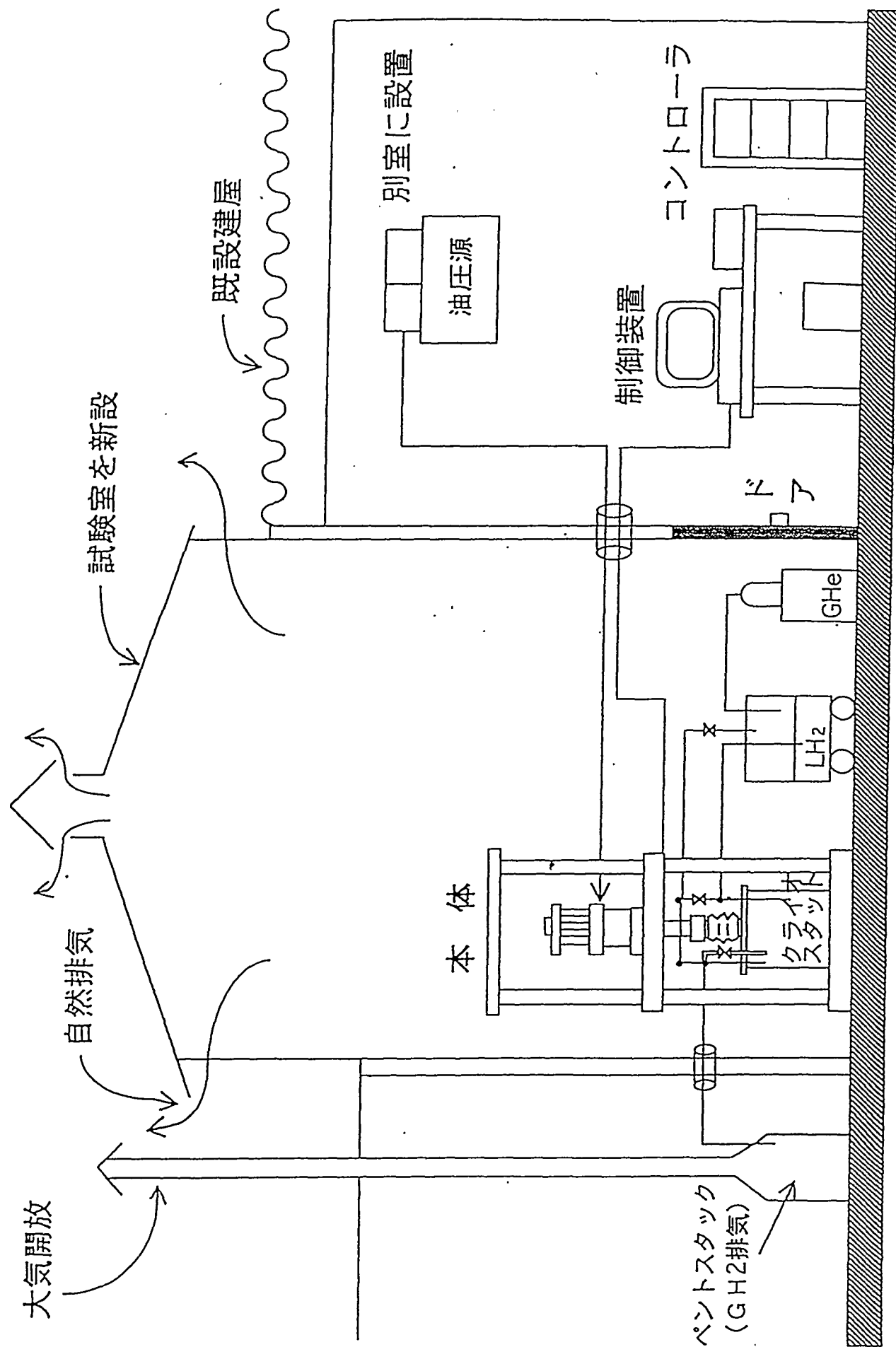


図 3.4-4 液体水素雰囲気下材料試験装置の全体図

3. 4. 2 分散輸送・貯蔵技術

エネルギー媒体として水素を世界的規模で製造・輸送・貯蔵・利用するシステムを構築するためには、大規模集中利用を想定した液体水素による輸送・貯蔵に加え、各種使用形態に適合する分散輸送・貯蔵技術の確立が強く望まれる。この分散輸送・貯蔵用技術としては水素吸蔵合金が有望である。そのため、新規の水素吸蔵合金の適用性に関する検討を行うとともに、内外の研究開発動向に関する調査を行った。

(1)適用性検討

水素吸蔵合金の適用分野としては定置式設備及び移動体への適用が想定される。定置用としては、液体水素貯蔵タンクのバッファー用、液体水素の気化分の固定用等の用途が挙げられる。移動体用としては水素自動車用燃料タンクへの適用が考えられる。本プロジェクトにおいては、水素吸蔵合金の目標性能は、現状の技術水準及び各種適用分野における要求仕様から以下のように定められている。

- (目標性能) ・有効水素吸蔵量 : 3wt%
- ・水素放出温度 : 100℃以下
- ・繰り返し寿命 : 5000回以上(初期の90%の貯蔵性能)

この性能を有する水素吸蔵合金について、ケーススタディを実施し、WE-NETの全体構想の中で、水素吸蔵合金が水素分散・輸送技術として、具体的にどのように利用され得るのかを検討した。

①分散型定置式貯蔵設備への適用性

水素を化石燃料や電力に代えて現在の分散型エネルギーシステムに利用するためには、分散する需要地で水素を貯蔵かつ供給できる定置式の水素貯蔵システムの開発が不可欠である。

このため、燃料電池による民生用の分散型水素利用を想定し、具体的な水素吸蔵合金の適用性を検討した。水素の輸送形態を考えた場合、軽量かつコンパクトな液体水素による貯蔵が有望であるが、液体水素は水素充填時のフ

ラッシュ水素と貯蔵時のボイルオフ水素の発生が避けられない。このため、液体水素貯蔵システムで不可避のフラッシュ水素とボイルオフ水素を水素吸蔵合金で回収利用する液体水素－水素吸蔵合金ハイブリッド型水素貯蔵システムの適用性と導入効果を検討した。

(検討条件)：

100戸規模住宅、電力負荷 = 20kWh/(日・戸)、熱負荷 = 20kWh/(日・戸)

水素使用量：1400Nm³ (1800 L - liqH₂) /100戸・日

水素充填周期：15日間隔

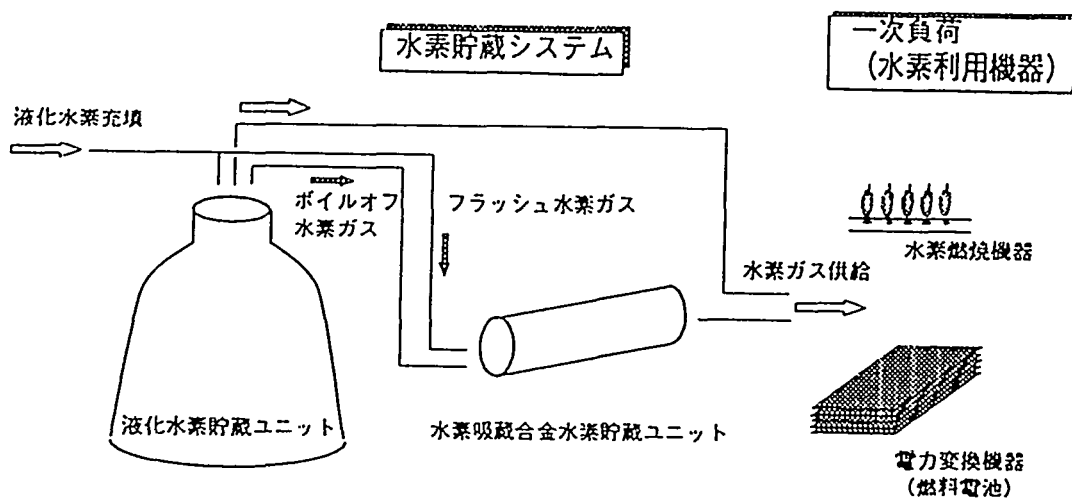


図 3.4-5 分散型定置式貯蔵設備のシステム概念設計

検討結果として、水素吸蔵合金で気化した水素ガスを回収利用することで10年償却が可能であり、かつ、設備寿命10年が可能なが示された。

②自動車用燃料タンク

水素吸蔵合金は、水素ガス圧力容器や液体水素タンクに比べ、安全性の点で優れている。また液体水素の場合は、移し替え時に10%の水素の蒸発（ロス）が発生するという欠点があり、自動車用燃料タンクは水素吸蔵合金の有望な適用分野として期待されている。

このため、自家用車クラスの燃料タンクとしての水素吸蔵合金の適用性を検討するため、容量が 50Nm^3 の燃料タンク（ガソリン：16L程度、走行距離：100～200km）を想定したところ、耐久性、重量の点で以下の仕様が得られた。

・吸放出回数：約5～30回/月

約70～400回/年

約700～4000回/10年（水素吸蔵合金の目標値：5000回）

・タンク重量：150kg（合金のみ）： $3\text{kg/Nm}^3 \times 50\text{Nm}^3$

3kg（水素分）： $90\text{g/Nm}^3 \times 50\text{Nm}^3$

今後は、①及び②の成果を踏まえ、定置式及び移動体用水素分散貯蔵システムの概念設計を進めていくこととしている。

(2)水素吸蔵合金の研究開発動向調査

現状技術による水素吸蔵合金の研究開発動向を調査したところ、それぞれの合金において、有効水素吸蔵量が少ない又は水素放出温度が高いといった欠点が存在し、第I期研究開発基本計画の目標性能を満たす水素吸蔵合金を探索するためには、新規の水素吸蔵合金を開発することが必要であることが明確化された。

以下に代表的な合金の特徴等について記す。

①希土類系合金

多元化と組成組織制御によりPCT特性の調製がほぼ可能である。用途としてはNi-H電池に利用されている。耐久性の向上が主要課題であり、低コスト化

と軽量化は困難である。

②チタン系合金

TiFeが水素吸蔵合金の開発初期に実証装置に使用されており、1.8wt%程度の水素吸蔵量を有する。しかし、初期活性化が進行しにくく、耐久性も劣る。多元化、表面処理、組織制御で改善を図れる可能性を有する。

③Mg系合金

Mgの融点が低く蒸気圧も高いため、Mg系合金の製造法には、特殊技術が要求される。二元合金を対象に、製法の調査検討を行った。なお、Mgは水素吸蔵量は多いが、水素放出温度も高い、という性質を持つ。

④ラーベス系合金（ラーベス相：二元合金系で AB_2 の元素組成をもち、原子半径の比が1.225に近い時に現れる結晶構造）

六方晶または立方晶の結晶構造を有する。AとBが相互の結晶格子位置を占めることができるために、AとBを他の元素で置換して多元化でき、多数の合金が存在する。この系で新規な水素吸蔵合金が開発される可能性が高い。この系の合金は、水素を比較的多量に吸蔵し、安価な成分からなる合金も多いが、活性化処理等の取り扱いが難しい。

⑤複合化水素吸蔵合金

近年、異種の水素吸蔵合金で複合化させて特性を向上させる方法が研究されている。これらの研究をMg系を中心に調査した。粉末焼結法、溶解・反応拡散法、不均化反応法、メカニカル・アロイング法、メカニカルグライデング法の合金調整法別に纏めた。初期活性の向上には有効だが、水素吸蔵量の増大には限界があることが判明した。

⑥水素吸蔵合金の表面処理

水素の反応場とバルク相の保護皮膜として重要な役割である合金表面の処理方法について、酸、アルカリ及びフッ化物水溶液について調査した。その結果、表面処理の効果は十分に解明されていないが、Ni-H電池用合金には熱アルカリ処理が実際に用いられており、水素貯蔵用合金についても水素化速度の向上手段として有望であることが判明した。

⑦ナノクリスタリン金属水素化物

ナノクリスタリン金属水素化物は、通常50nm以下の粒径からなる微粒子水素

吸蔵合金である。結晶性合金と非晶質合金の中間の結晶化度を有し、水素化反応活性の向上と微粉化の抑制に有効である。

表3.4-9に水素吸蔵合金の現状の特性を示す。今後は、残された第Ⅰ期の期間において、Mg, Ti, Ca, V等の軽量金属を主成分とする新規な水素吸蔵合金の探索を行い、開発の見通しを得る。

表3.4-9 水素吸蔵合金の特性

項目	代表的な合金組成	水素放出温度(℃)	水素密度(wt%)
Mg-Ni系	Mg ₂ Ni	250	3.2 (3.2) *)
La-Ni系	MmNi ₅	常温	1.3 (1.2)
Ti-Fe系	TiFe	常温	1.8 (1.6)
V系	V	常温	3.8 (1.8)
Mg系	Mg	300	7.0 (7.0)
Ti系	Ti ₂ Mn ₃	100以下	1.9 (1.6)

*) 数値は水素吸収量、()内は水素放出量を示す。

3. 5 水素利用技術

3. 5. 1 水素燃焼タービンの開発

水素の大規模利用として期待される発電分野への水素利用として、本プロジェクトにおいては、水素と酸素を直接反応させて燃焼させる水素燃焼タービンの開発を進めている。水素燃焼タービンを用いた発電サイクルは、化石燃料を燃焼させる従来の火力発電の方式に比べて、以下の画期的な利点を有している。

- 燃焼生成物は水のみとなり、 NO_x 、 SO_x 、 CO_2 その他有害物質の発生がない。
- 従来の蒸気タービンサイクルは、外燃機関であったため、伝熱材料の耐熱温度の制限により高温化が難しかったが、水素と酸素とを燃焼することにより高温の蒸気タービンサイクルの実現が可能となり、発電効率が高くなる。また、燃焼で発生した蒸気を最終的に復水させることにより、プラントから系外に排出されるのは水だけとなり排ガスのないプラントの成立が可能である。
- 従来型の発電方式のうちでもっとも効率の高い複合発電方式は、ガスタービンサイクル（ブレイトンサイクル）と蒸気タービンサイクル（ランキンサイクル）の組み合わせであるが、2つのサイクルの流体が異なるため、熱交換に伴う有効エネルギーのロスが避けられない。一方、水素燃焼タービンサイクルでは2つのサイクルの流体が同一であるため、これらを融合してロスを低減したサイクルが実現可能であり、高効率が期待できる。
- 発電効率の向上にはタービン入口温度の高温化が有効である。しかし、化石燃料と空気を用いる従来のガスタービンでは、高温化に伴い増加する NO_x の生成を抑制しつつ高温化を図る必要がある。一方、水素燃焼タービンでは NO_x が全く生成しないため、比較的容易に高温化することが可能で、高効率が期待できる。

このような利点を有する水素燃焼タービンについて、第Ⅰ期においては、タービン入口温度 1700°C の下で、発電端効率60%以上を達成しうる最適なサイクル、燃焼制御方式及びタービン翼冷却構造を決定するための検討とともに、補機類に関する調査及び概念設計並びにタービン入口温度 2000°C を目標とした超高温材料に関する基礎研究を行っている。

(1) 最適システムの評価

水素燃焼タービン発電システムにおいて、各種サイクルの効率、運用性、実現性等の検討を行い最適なサイクルを選定するとともに、500MW級発電プラントの概念設計を行い、プラントのイメージを明確化することを目的としている。具体的には、第Ⅰ期研究開発基本計画で示された目標値である、タービン入口温度1700℃の下での発電端効率60%以上（高位発熱量基準）を達成しうる最適なシステムを決定する。このため、委託先である（財）電力中央研究所に最適システム評価部会を設置し、学識経験者による専門的検討を行った。

平成5～8年度までの研究計画として、以下の順序で段階的な検討を進めた。

① 作動流体の高温物性の調査

水素燃焼タービンサイクルは、これまでにない高温の作動流体を利用するものであり、この熱物質収支計算を行うためには2000℃程度までの高温物性値が必要である。しかしながら、たとえば、水蒸気については日本機械学会の蒸気表には800℃までのデータしかなく、高温物性値について信頼できるデータの調査が必要であった。このため、平成5年度には、水蒸気などの作動流体の高温物性値を得るため、下記の資料を収集した。

- ・ N B S steam table
- ・ 国際ガスタービン会議(1983)における論文集の高温蒸気物性推定式
- ・ 「便覧 気体と液体の熱物理的性質」（日ソ通信社）
- ・ J A N A F Thermochemical Tables 3rd Edition

これらの文献について検討した結果、蒸気表としてはNBS（現NIST）の蒸気表が信頼性、適用範囲ともに最もすぐれていることが分かり、以後の検討にはこの蒸気表を用いることとした。また、不活性ガスの物性については、JANAFのデータを基本として日ソ通信社のデータを補完的に用いることとした。

N B S : National Bureau of Standard

N I S T : National Institute of Standards and Technology

② 水素燃焼タービンに関する海外調査

水素燃焼タービンに関する海外の情報を入手するため、欧米の専門機関に調査団を派遣した。その結果、以下の有益な情報が得られた。このうち、オーストリアのグラーツ工科大学では、水素・酸素燃焼を利用した独特のサイクルであるグラーツサイクルについての情報を入手した。

(a) グラーツ工科大学

グラーツ工科大学のProf. Herbert Jerichaにより考案されたグラーツサイクルは、トッピングサイクルであるブレイトンサイクルとボトムリングサイクルであるランキンサイクルが共に水蒸気を作動媒体としている点に着目し、トッピング側の作動媒体を直接ボトムリング側で利用し、性能向上を達成しており、水素燃焼タービンを想定した全く新しいタイプのシステムである。

(図3.5.1-1)

(b) DLR (ドイツ航空宇宙研究所)

ALIAN5型ロケット用液体水素エンジン等を開発している化学推進工学研究所では、水素・酸素スチームジェネレータ（出力65MW）で数年来運転を実施しており、水素・酸素燃焼後の残存水素、酸素の測定技術を確立している。

(c) ミュンヘン工科大学

ミュンヘン工科大学の専門家から、最適システムの評価に当たっては、トッピングとボトムリングが同一作動媒体（水蒸気）である点を十分に活かすことと、機器の成立性を十分考慮する必要があるとの助言を得た。

③ 各種サイクルの絞り込み

平成6年度までに再委託先である民間企業等から提案された各種のサイクルについて、同一条件の下で発電端効率を計算するとともに、委託先の最適システム評価部会において比較検討を行った。（表3.5.1-1参照）

このうち、不活性ガス循環サイクルは、アルゴン、二酸化炭素を用いた場合について詳細検討を実施したが、発電端効率60%を達成できる可能性がないことが明らかとなり、不活性ガス循環サイクルについては、最適システムの検討対象から除外した。

次に水蒸気直接膨張サイクルは、発電端効率60%の達成が難しく、また、

サイクルの構成上、冷却蒸気の確保が困難で実現性が低いことから検討対象から除外した。

トッピング抽気サイクル及びボトミング再熱サイクル-1,2については、両サイクルとも高効率の達成が可能であることが明らかとなったが、機器の実現性の観点から、トッピング抽気サイクルがより優れているとの結論を得た。なお、トッピング抽気サイクルは、提案企業による更なる検討の結果、最終的にはトッピング再生サイクルに改められた。

さらに、再熱ランキンサイクルと再燃式ガスタービンを統合した新ランキンサイクルが再委託企業から新たに提案された。また、別の再委託企業からも、再熱ランキンサイクルをベースとして、効率と実現性の観点から再熱再生ランキンサイクルが新たに提案された。

表 3.5.1-1 発電端効率比較表（計算値）

提案サイクル 最高温度：1700℃	発電端効率(HHV,%) 冷却媒体量割合	
	0 %	1 5 %
不活性ガス循環サイクル(Ar)	5 4. 0	5 2. 0
不活性ガス循環サイクル(CO ₂)	5 5. 4	5 3. 9
水蒸気直接膨張サイクル	5 8. 5	5 5. 5
トッピング抽気サイクル	6 1. 5	6 0. 5
ボトミング再熱サイクル-1	6 1. 5	6 0. 2
ボトミング再熱サイクル-2	6 2. 2	6 1. 4
再熱ランキンサイクル	6 0 ~ 6 1	5 7 ~ 5 8

最適システム評価部会による絞り込みの結果として、平成6年度末には以下の3サイクルが最適システムの検討対象として残った。

- ・新ランキンサイクル（図3.5.1-2）
- ・トッピング再生サイクル（図3.5.1-3）
- ・再熱再生ランキンサイクル（図3.5.1-4）

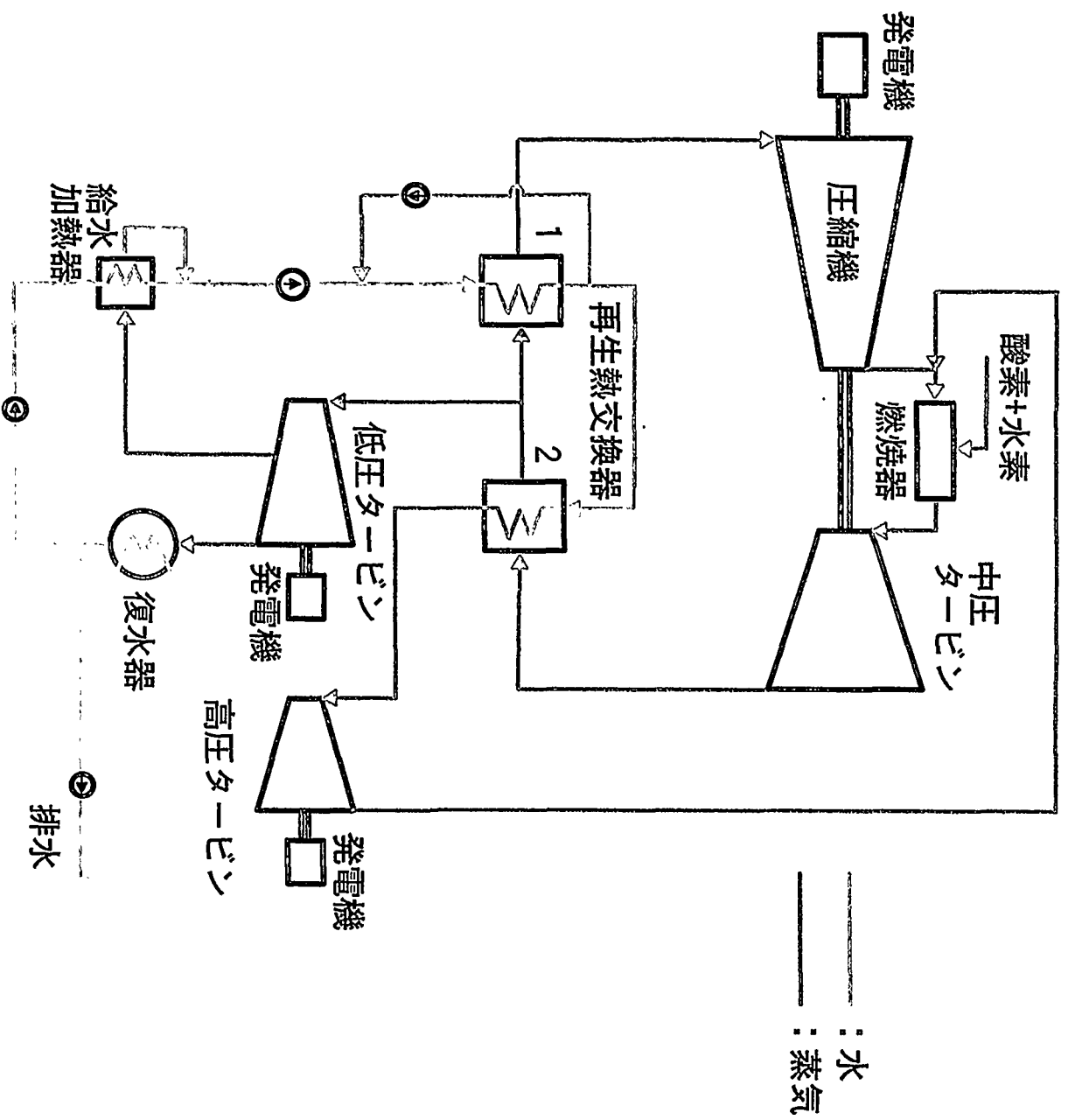


図 3.5.1-1 グラスサイクル系統図

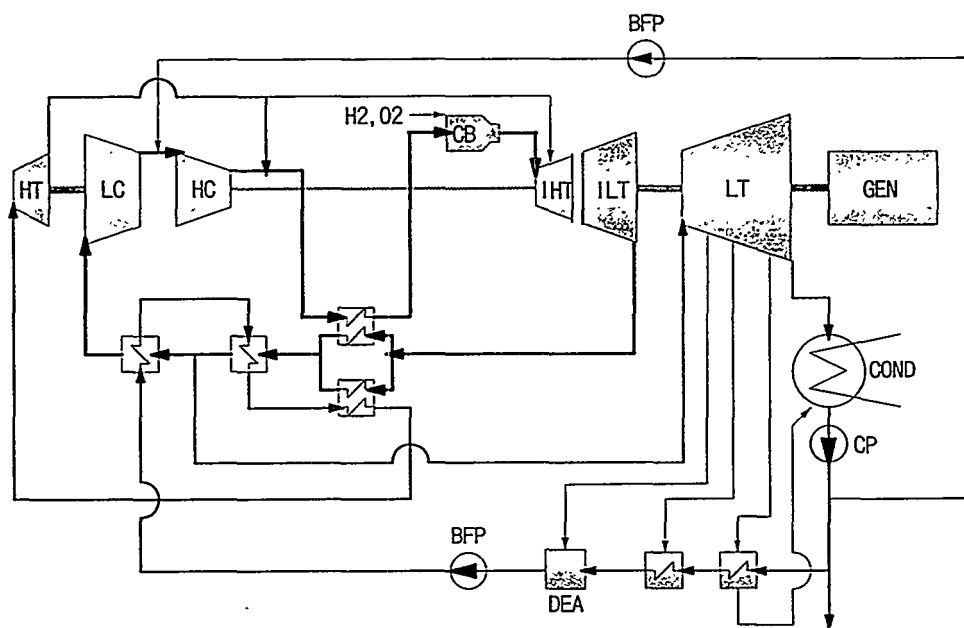


図 3.5.1-2 トッピング再生サイクル

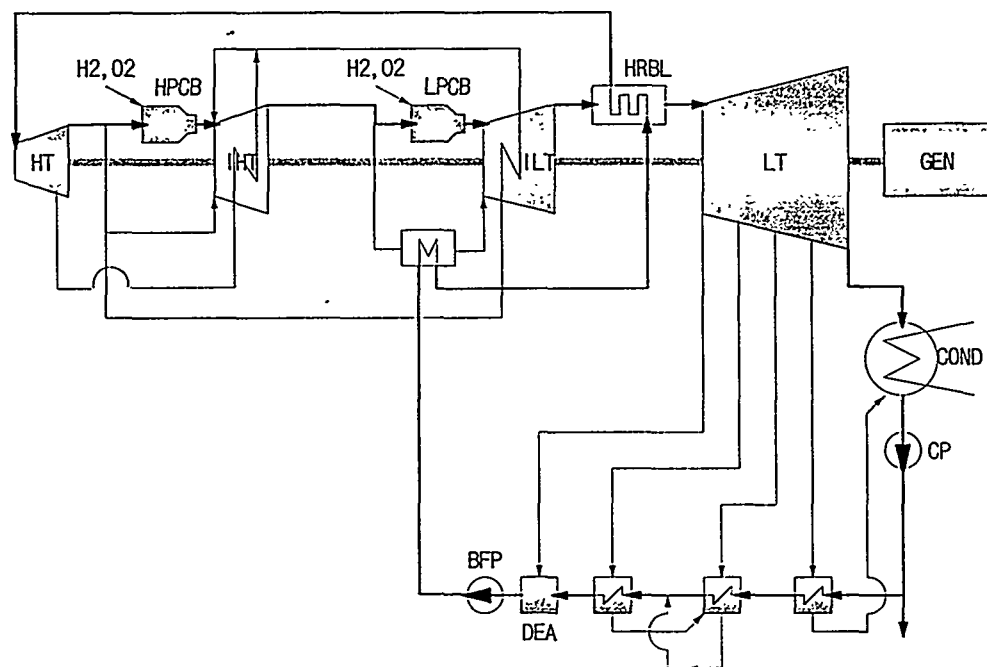


図 3.5.1-3 新ランキンサイクル

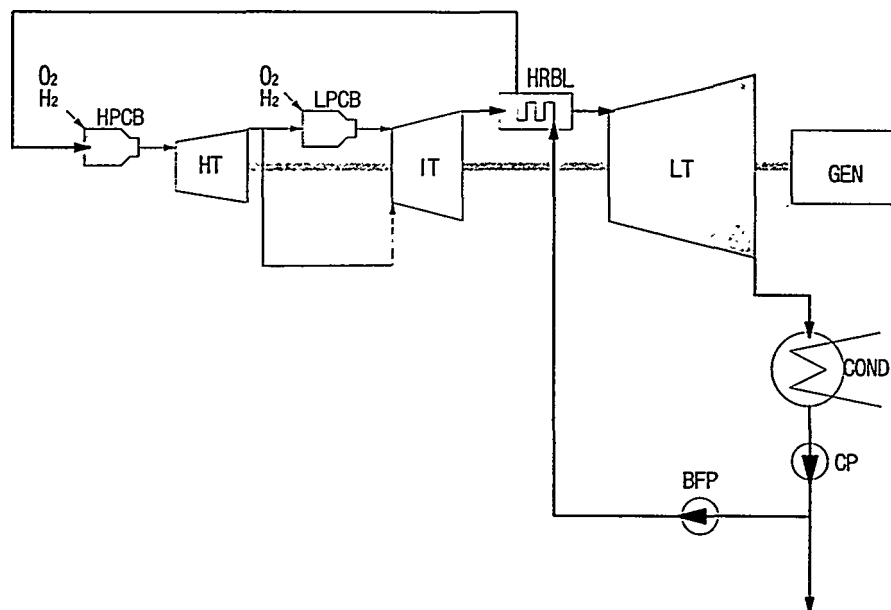


図 3.5.1-4 再熱再生ランキンサイクル

略号

HT: High Pressure Turbine(中高压タービン)
 IT: Intermediate Pressure Turbine(中压タービン)
 IHT: Intermediate High Pressure Turbine(中高压タービン)
 ILT: Intermediate Low Pressure Turbine(中低压タービン)
 LT: Low Pressure Turbine(低压タービン)
 LC: Low Pressure Compressor(低压圧縮機)
 HC: High Pressure Compressor(高压圧縮機)
 GEN: Generator(発電機)
 HRBL: Heat Recovery Boiler(排熱回収ボイラ)
 COND: Condenser(復水器)
 CP: Condensate Pump(復水ポンプ)
 BFP: Boiler Feed Pump(加圧ポンプ)
 DEA: Deaerator(脱気器)
 CB: Combustor(燃焼器)
 HPCB: High Pressure Combustor(高压燃焼器)
 LPCB: Low Pressure Combustor(低压燃焼器)

④発電プラントの概念設計

平成7年度においては、3サイクルについて500MW級発電プラントの概念設計を以下の前提条件の下で行い、目標とする発電端効率60%を概ね達成できる見通しを得た。各機器の設計条件を表3.5.1-2、表3.5.1-3に示す。

(サイクル設計前提条件)

発電容量	: 500MW
タービン入口最高温度	: 1700℃
大気条件	: 15℃, 1.013bar, 相対湿度60%
海水温度	: 21℃ (復水器真空度0.05bar)
水素・酸素供給条件	: 大気温度 (15℃) 圧力: 任意

⑤最適システムの選定

平成8年度においては、最適システム評価部会において、最適システムを選定する評価方法について検討し、多目標評価法を用いることとした。また、同部会において発電効率、実用性など、評価に用いる項目について議論し、表3.5.1-4に示す各項目を決定した。さらに、最適システム評価部会及び親委員会の水素燃焼タービン開発委員会委員を対象とした各評価項目の重要度に関するアンケート調査を行い、この結果、各評価項目の重みは高い順に、実現性(25.2%)、環境性(20.7%)、発電効率(16.8%)、信頼性(15.6%)、経済性(12.5%)、独創性(6.5%)、敷地面積(2.8%)となった。

多目標評価法を用いて3サイクルを評価した結果を表3.5.1-4に示す。総合評価の点数としては、高い方からトップシグ再生サイクル、新ランキンサイクル、再熱再生ランキンサイクルの順となった。このうち、発電端効率60%の目標値を達成したのは、トップシグ再生サイクル及び新ランキンサイクルの2方式であった。再熱再生ランキンサイクルは、最終的には目標値を達成することが出来なかった。

この評価結果を元にして、平成8年度中に最適システムを一つ選定することとしている。

算出条件①

新ランキンサイクル			再熱再生ランキンサイクル		
出力	52.5	高圧タービン (HT)	出力	81.6	
入口温度/圧力	750.0/343.2		入口温度/圧力	650.0/350.0	
出口温度/圧力	455.0/69.7		出口温度/圧力	280.0/40.0	
蒸気流量	96.5		蒸気流量	149.7	
回転数	3600		回転数	3600	
最小翼高さ	11.0		最小翼高さ	23.0	
断熱効率	93.0		断熱効率	93.0	
出力	183.8	中圧タービン (IT)	出力	362.0	
入口温度/圧力	1700.0/66.2		入口温度/圧力	1700.0/38.8	
出口温度/圧力	1086.3/7.9		出口温度/圧力	740.0/1.15	
蒸気流量	120.4		蒸気流量	154.3	
回転数	7800		回転数	3600	
最小翼高さ	75.0		最小翼高さ	74.0	
断熱効率	93.0		断熱効率	93.0	
出力	204.7	低圧タービン (LT)	出力	74.0	
入口温度/圧力	1700.0/7.8		入口温度/圧力	110.0/1.06	
出口温度/圧力	1111.4/1.0		出口温度/圧力	33.0/0.05	
蒸気流量	140.5		蒸気流量	177.5	
回転数	3600		回転数	3600	
最小翼高さ	127.0		最小翼高さ	178.0	
断熱効率	93.0		断熱効率	93.0	
出力	59.0				
入口温度/圧力	148.0/1.0				
出口温度/圧力	32.6/0.05				
蒸気流量	147.1				
回転数	3600				
最小翼高さ	-				
断熱効率	93.0				
供給酸素流量/圧力	26.6/69.7	高圧燃焼器	供給酸素流量/圧力	50.0/360.0	
供給水素流量/圧力	3.3/69.7		供給水素流量/圧力	1.7/360.0	
供給蒸気流量	64.4		供給蒸気流量	98.0	
温度/圧力	455.0/69.7		温度/圧力	397.0/365.0	
出口蒸気流量	120.4		出口蒸気流量	149.7	
温度/圧力	1700.0/66.2		温度/圧力	650.0/350.0	
供給酸素流量/圧力	18.7/7.9	低圧燃焼器	供給酸素流量/圧力	36.8/40.0	
供給水素流量/圧力	2.4/7.9		供給水素流量/圧力	4.6/40.0	
供給蒸気流量	119.4		供給蒸気流量	112.9	
温度/圧力	1086.3/7.9		温度/圧力	288.0/40.0	
出口蒸気流量	140.5		出口蒸気流量	154.3	
温度/圧力	1700.0/7.8		温度/圧力	1700.0/38.8	
	99.2	発電機効率		99.2	
	99.0	機械効率		98.0	

トッピング再生サイクル				
タービン	高圧タービン (H T)	出力 入口温度/圧力 出口温度/圧力 蒸気流量 回転数 最小翼高さ 断熱効率	35.5 MW 593.0 °C/350.0 bar 291.0 °C/50.0 bar 74.47 kg/s 16000(3000) rpm 17.0(3.2) mm 93.0 %	高圧タービン (H T)
	高温高圧タービン (I H T)	出力 入口温度/圧力 出口温度/圧力 蒸気流量 回転数 最小翼高さ 断熱効率	100.0 MW 1700.0 °C/45.1 bar 1370.0 °C/24.0 bar 234.2 kg/s 7500 rpm 85.0 mm 93.0 %	中高圧タービン (I H T)
	高温低圧タービン (I L T)	出力 入口温度/圧力 出口温度/圧力 蒸気流量 回転数 最小翼高さ 断熱効率	408.0 MW 1370.0 °C/24.0 bar 756.0 °C/ 1.2 bar 3000 rpm 64.0 mm 93.0 %	中低圧タービン (I L T)
	低圧タービン (L T)	出力 入口温度/圧力 出口温度/圧力 蒸気流量 回転数 最小翼高さ 断熱効率	63.0 MW 235.0 °C/1.05 bar 33.0 °C/0.05 bar 134.1 kg/s 3000 rpm 406.0 mm 93.0 %	低圧タービン (L T)
燃焼器		供給酸素流量/圧力 供給水素流量/圧力 供給蒸気流量 温度/圧力 出口蒸気流量 温度/圧力	45.3 kg/s/55.13 bar 5.7 kg/s/55.13 bar 183.3 kg/s 700.0 °C/47.5 bar 234.2 kg/s 1700.0 °C/45.1 bar	高圧燃焼器
				低圧燃焼器
圧縮機	低圧圧縮機 (L C)	動力 入口温度/圧力 出口温度/圧力 蒸気流量 回転数 断熱効率	28.6 MW 105.0 °C/1.0 bar 234.0 °C/3.1 bar 114.8 kg/s 3000 rpm 89 %	
	高圧圧縮機 (H C)	動力 入口温度/圧力 出口温度/圧力 蒸気流量 回転数 断熱効率	100.4 MW 139.0 °C/ 3.1 bar 550.0 °C/50.0 bar 123.5 kg/s 7500 rpm 89 %	
発電機	発電機効率		99.2 %	発電機効率
機械損失等	機械効率		99.5 %	機械効率

算出条件②

ランキンサイクル		再熱再生ランキンサイクル			
流体 流量 入口／出口温度 入口／出口圧力 流体 流量 入口／出口温度 入口／出口圧力 流量 温度効率 温度効率 平均温度差	147.5 1111.4/148.0 1.0/1.0 96.5 129.1/750.0 361.3/343.2 317.0 98 63 116.1	熱回収ボイラ (H R B L) 主蒸気		高温側流体 流量 入口／出口温度 入口／出口圧力 低温側流体1流量 入口／出口温度 入口／出口圧力 交換熱量 高温側温度効率 低温側温度効率 対数平均温度差	177.5 740.0/110.0 1.15/1.06 98.0 36.0/397.0 385.0/365.0 171.6 89 51 175.4
		熱回収ボイラ 冷却用蒸気		低温側流体2流量 入口／出口温度 入口／出口圧力 低温側温度効率 対数平均温度差	23.1 33.0/269.0 40.0/39.0 33 217.6
入口／出口圧力 効率	143.1 0.05/2.1 85.0	復水ポンプ (C P)		流量 入口／出口圧力 断熱効率	121.1 0.05/40.0 85.0
入口／出口圧力 効率	96.5 0.9/380.3 85.0	加圧ポンプ1 (B F P 1)		流量 入口／出口圧力 断熱効率	98.0 40.0/385.0 85.0
入口／出口圧力 効率	4.0 0.5/1.9 85.0				

トッピング再生サイクル				新ラ	
熱交換器	再生熱交換器14	高温側流体 流量 入口／出口温度 入口／出口圧力 低温側流体 流量 入口／出口温度 入口／出口圧力 交換熱量 高温側温度効率 低温側温度効率 対数平均温度差	169.1 kg/s 756.0/529.0 °C 1.17/1.11 bar 157.7 kg/s 489.0/700.0 °C 50.0/47.5 bar 83.7 MW 85 % 79 % 47.6 °C	熱回収ボイラ (H R B L)	高温側 入口 入口 低温側 入口 入口 交換熱 高温側 低温側 対数平
	再生熱交換器15	高温側流体 流量 入口／出口温度 入口／出口圧力 低温側流体 流量 入口／出口温度 入口／出口圧力 交換熱量 高温側温度効率 低温側温度効率 対数平均温度差	79.9 kg/s 756.0/529 °C 1.17/1.11 bar 74.47 kg/s 473.0/593.0 °C 368.0/350.0 bar 42.6 MW 80 % 43 % 100.1 °C		
	再生熱交換器 5	高温側流体 流量 入口／出口温度 入口／出口圧力 低温側流体 流量 入口／出口温度 入口／出口圧力 交換熱量 高温側温度効率 低温側温度効率 対数平均温度差	249.0 kg/s 529.0/235.0 °C 1.11/1.05 bar 74.47 kg/s 177.0/473.0 °C 388.0/368.0 bar 150.9 MW 84 % 84 % 57.0 °C		
	再生熱交換器 6	高温側流体 流量 入口／出口温度 入口／出口圧力 低温側流体 流量 入口／出口温度 入口／出口圧力 交換熱量 高温側温度効率 低温側温度効率 対数平均温度差	114.8 kg/s 235.0/105.0 °C 1.05/1.00 bar 74.47 kg/s 82.0/177.0 °C 408.0/388.0 bar 29.7 MW 85 % 62 % 37.8 °C		
ポンプ	復水ポンプ (C P)	流量 入口／出口圧力 断熱効率	71.8 kg/s 1.00/1.17 bar 78.0 %	復水ポンプ (C P)	流量 入口／ 断熱効
	加圧ポンプ (B F P)	流量 入口／出口圧力 断熱効率	74.5 kg/s 1.00/408.2 bar 78.0 %	加圧ポンプ1 (B F P 1)	流量 入口／ 断熱効
				加圧ポンプ2 (B F P 2)	流量 入口／ 断熱効

表 3.5.1-4 3 サイクルの評価結果

大項目	小項目	重み	評価指標	単位	トッピング [*] 再生サイクル	新ランキン サイクル	再熱再生 ランキンサイクル
発電効率	定格効率(目標:60%)	16.8%	発電端効率	% (HHV)	61.8	61.7	55.2
経済性	建設コスト	3.6%	建設コスト	万円/kW	9.36	9.20	8.40
	発電コスト	8.9%	発電コスト	円/kWh	24.63	24.62	28.07
実現性	要素技術の開発度	16.8%	総合開発度	%	77.9	74.9	77.2
	開発費用	8.4%	開発費用	億円	163	170	140
信頼性		15.6%	定検外利用率	%	75	80	85
敷地面積		2.8%	単位出力当たり敷地面積	m ² /kW	0.0200	0.0135	0.0060
環境性	NOx	9.2%		ppm	0.0	0.0	0.0
	SOx	9.2%		ppm	0.0	0.0	0.0
	温排水量	2.3%		t/s	11.0	11.0	14.4
独創性		6.5%			70	70	70
総合評価	点数	100.0%			79.1	78.3	68.8

(2) 燃焼制御技術の開発

第Ⅰ期研究開発計画においては、タービン入口温度1700℃の下で、発電端効率60%以上（高位発熱量基準）を達成し得る燃焼制御方式を決定することとなっている。このため、平成5～8年度の期間においては、以下の項目について検討を進めた。

① 水素・酸素燃焼器の燃焼方式・基本構造の検討

(a) 各種燃焼器構造の調査・検討

化学平衡に基づいた燃焼反応解析により、水素・酸素燃焼の基本特性を把握すること及びロケット燃焼器、ジェットエンジン用燃焼器など各種水素・酸素燃焼器の燃焼方式、基本構造の調査・検討結果をもとに水素燃焼タービン用燃焼器の燃焼方式、基本構造の検討を行った。各社から提案された方式については、②各方式の内容の項目で詳細に述べるが、各方式について、共通の知見が得られたのでその成果のまとめを(b)、(c)に示した。

(b) 安定燃焼技術・バーナー構造の検討

小型バーナーの常圧燃焼試験と加圧燃焼試験を実施することにより、水素・酸素燃焼器用バーナーの構造と水蒸気を用いる水素・酸素燃焼の特性を検討し、燃焼器の燃焼方式、バーナー構造を明らかにした。

これらの結果、以下の知見が得られた。

- (イ) 水素・酸素の完全燃焼は難しく、当量比1の水素・酸素燃焼時でも燃焼排ガス中に水素又は酸素が残留する。
- (ロ) 水素又は酸素のうち、その一方を過剰に供給することにより、他方のガスの残留を無くすることができる。
- (ハ) 酸素を水蒸気で希釈して燃焼器に供給する場合、水蒸気中の酸素濃度は燃焼吹き消えに影響を及ぼすが、水蒸気温度と燃焼圧力が燃焼吹き消えに及ぼす影響は小さい。

(c) モデル燃焼器による常圧燃焼試験による燃焼特性の検討

モデル燃焼器を設計・製作し、常圧燃焼試験を実施することにより、燃焼

器形状での水素・酸素燃焼特性を明らかにするとともに、水蒸気による燃焼器壁面冷却の特性および高温燃焼ガスの希釈特性について検討した。

その結果、以下の知見が得られた。

(イ)スムーズな着火及び安定した燃焼が可能である。

(ロ)燃焼排ガス中には、バーナー燃焼試験と同様に水素又は酸素が残留する
のが常圧での水素・酸素残留濃度は、平衡濃度近辺まで低減できる可能性
がある。

(ハ)水蒸気によるフィルム冷却を主体にした燃焼器壁面冷却構造を採用する
とともに、火炎形状及び希釈構造の適正化を図ることにより、壁面温度を
材料の耐熱許容温度以下に維持できる。

②各方式の内容

燃焼器の開発は、提案企業3社に再委託されており、それらの燃焼方式は
各社独自の提案に基づいて進められているため、具体的成果について各方式
にまとめたものを以下に詳述する。

(a)アニュラー型

航空機用ガスタービン燃焼器を転用した方式として、アニュラー型パイロ
ットプラント燃焼器を開発対象とし、実機と同スケールのセクターモデル燃
焼器を設計試作した（図3.5.1-5）。当燃焼器の主要な仕様は以下のとおりで
ある。

(イ)酸素／水蒸気の予混合希釈後、スワラーによる旋回噴射

30％以下に希釈することにより酸素火災の危険性を低減し、1次燃焼領
域の火炎温度を2200℃以下に抑制。

(ロ)水素多孔噴射

(ハ)フィルム冷却方式

(ニ)入口／出口温度：500/1700℃

この燃焼器を用いた常圧燃焼試験の結果、図3.5.1-6より水蒸気温度500℃
での着火限界及び吹き消え限界は、酸素濃度に依存し、各々約7％及び5％
であることを確認した。また、水素流量は定格の1/20まで火炎の安定を確認
した。燃焼排ガス中の残留水素・酸素濃度測定結果を図3.5.1-7に示す。

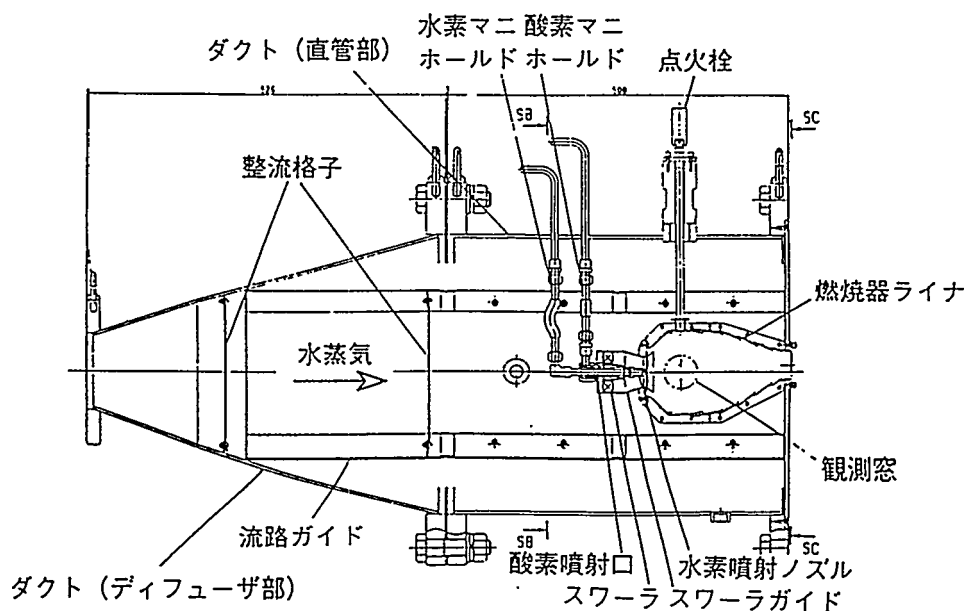


図 3.5.1-5 供試体全体図

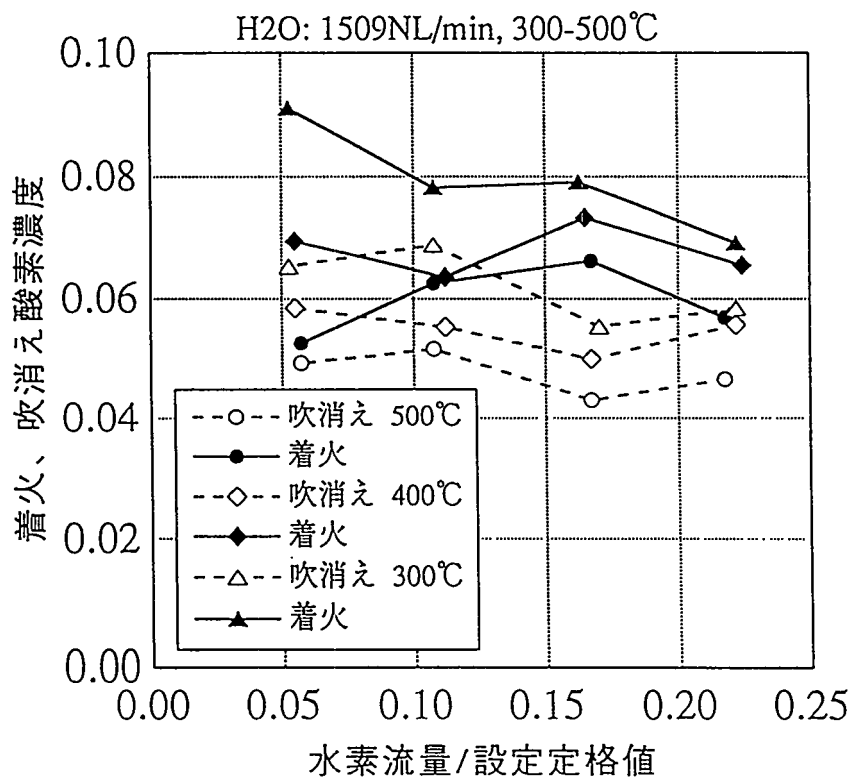


図 3.5.1-6 着火・吹き消え限界

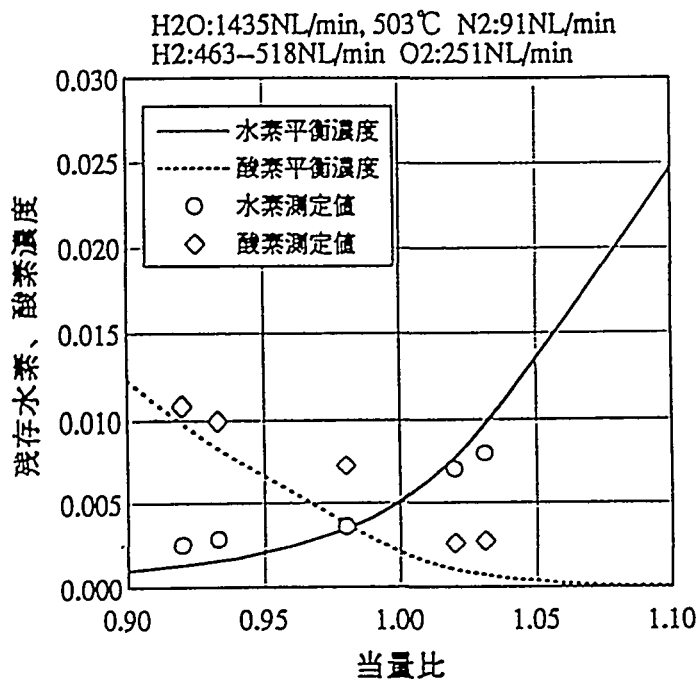


図 3.5.1-7 残存水素・酸素濃度

(b) マルチ・キャン型 - 1

- (イ) 燃焼器内部を燃焼領域と希釈領域に分け、燃焼領域ではできるだけコンパクトな火炎を形成し、大きな希釈領域を確保する。
- (ロ) 安定燃焼と短炎化及び残留水素・酸素濃度の低減のため、燃焼領域では水素・酸素理論混合比（当量比 = 1）での燃焼を行い、燃焼反応終了後に水蒸気との混合を行う。
- (ハ) 小型バーナ及びモデル燃焼器の常圧燃焼試験を実施し、燃焼特性を検討した結果、本燃焼方式では、燃焼領域での水素と酸素の混合に水蒸気の流れを利用できないため、火炎長さが長くなりやすく、図 3.5.1-8 に示すように燃焼領域の混合強化を図る必要があることを明らかにした。

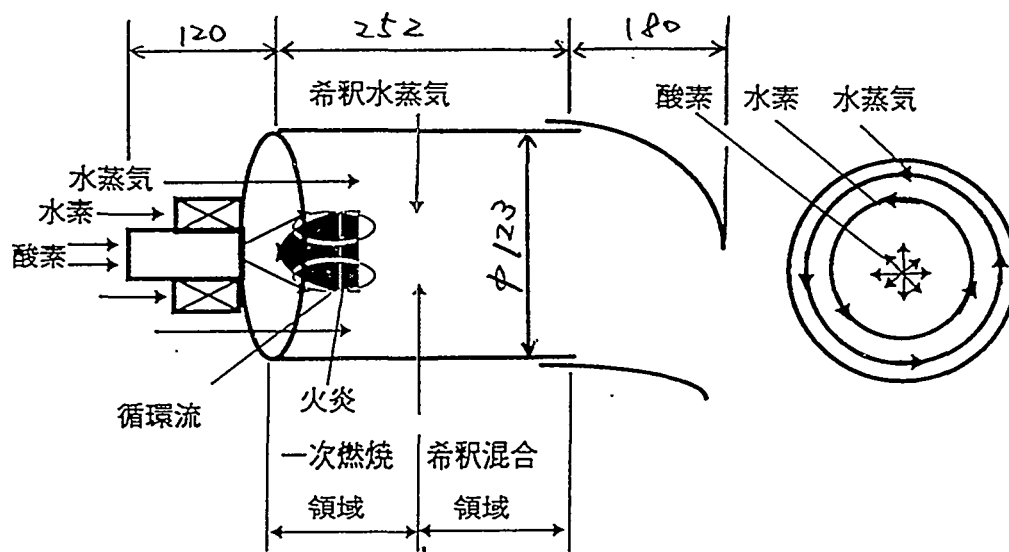


図3.5.1.8 混合を強化した燃焼器

(c) マルチ・キャン型 - 2

基礎バーナー試験装置を用いて燃焼安定性、燃焼排ガス組成調査を実施した。保炎のための循環流を確保できるように燃焼器形状を最適化し、燃焼器出口形状を決定した。水素・酸素燃焼器の概念設計結果を図3.5.1-9に示す。なお、水素は多孔噴射とした。

小型バーナー（モデル燃焼器）を用いた加圧燃焼試験における燃焼排ガス中残存酸素・水素調査結果を図3.5.1-10に示す。

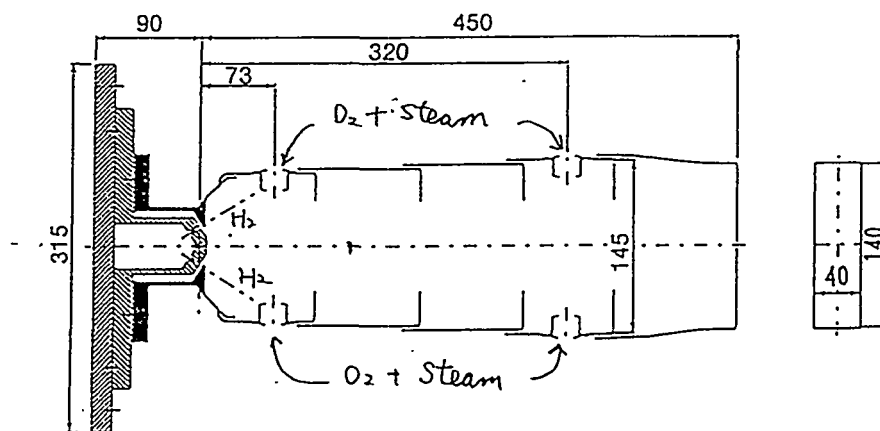


図3.5.1-9 燃焼器イメージ図

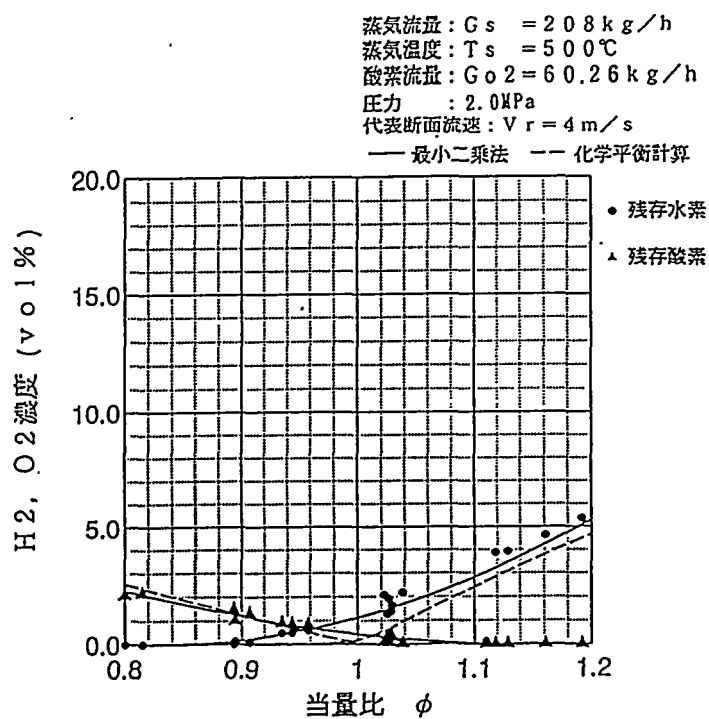


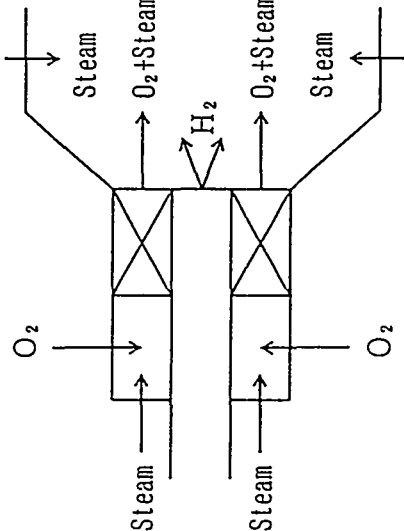
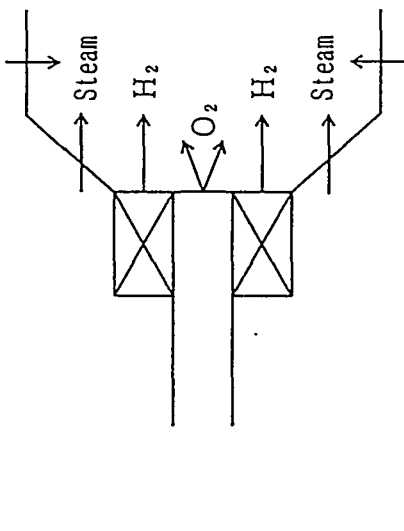
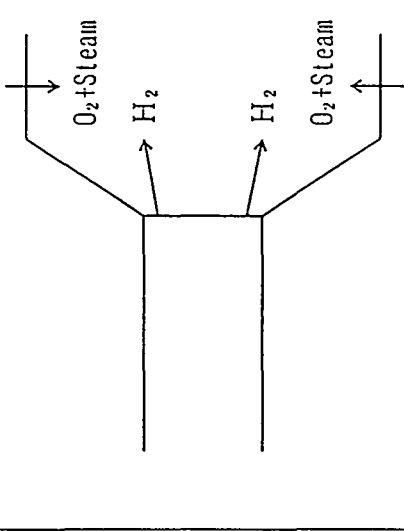
図 3.5.1-10 残存水素・酸素濃度

以上の 3 方式を表 3.5.1-5 にまとめた。

③ 今後の予定

上記①、②の検討結果を基に、平成 9 年度に評価試験用燃焼器の設計・試作及び評価試験設備の試運転を行い、平成 10 年度に高圧燃焼試験を実施する。この結果に基づき、水素燃焼タービン用燃焼器の最適燃焼方式及び基本構造を明確化し、最適な燃焼器 1 方式を選定する予定である。

表 3.5.1-5 水素燃焼タービン用燃焼制御技術の検討状況

燃焼器形態	燃焼方式		
	方式	バーナ構造	バーナ出口で酸素を水蒸気で希釈する。その後、バーナ出口で水素と燃焼させる。
燃焼方式	方式	 水素：多孔噴射、酸素+水蒸気：スワラ	バーナ内部にて酸素を水蒸気で希釈する。その後、バーナ出口で水素と燃焼させる。 燃焼反応終了後に水蒸気と混合する。
	保炎方法	 水素：スワラ、酸素：多孔噴射	バーナ出口で水素と酸素を燃焼させる。 燃焼反応終了後に水蒸気と混合する。
燃焼方式	方式	 水素：多孔噴射	バーナ手前にて酸素を水蒸気で希釈する。その後、バーナ出口で水素と燃焼させる。
	保炎方法	水素と水蒸気の旋回流	希釈水蒸気（酸素を含む）の対向噴流
壁面冷却方式	排ガス分析法	酸素+水蒸気の旋回流	水素と水蒸気の旋回流
	火炎監視	酸素+水蒸気の旋回流	水素と水蒸気の旋回流
制御方式	火炎監視	酸素+水蒸気の旋回流	水素と水蒸気の旋回流
	制御方法	酸素+水蒸気の旋回流	水素と水蒸気の旋回流

(3)タービン・ロータ等主要構成機器の開発

平成5年度から平成8年度までの研究計画として、タービン入口温度1700℃の下で、発電端効率60%以上（高位発熱量基準）を達成し得るタービン翼冷却構造を決定することとしている。また、ロータについては、最小冷却媒体量で主流の高温ガスがタービン内部構造のキャビティ部への流入量を一定値以下に抑えるような冷却設計法を開発することとしている。

①タービン翼冷却技術の開発

水素燃焼タービンは、従来のガスタービンコンバインドサイクルと異なり作動流体が水蒸気のみとなる。空気に比べ水蒸気は比熱（ C_p ）が大きいことから翼への流入熱量が増大する。これに対処するためには、翼への流入熱量を低減するフィルム冷却、TBC（サーマルバリアコーティング）等の要素技術開発が必要となる。

翼の外表面冷却方法としては、フィルム冷却方式や全面膜冷却方式（FCFC）、しみだし冷却方式（トランスピレーション冷却）などがあげられる。翼の内表面冷却方式としては、インピンジメント冷却やピンフィン冷却方式あるいはサーペントイン冷却方式があり、これらの熱伝達特性を促進させる技術の検討が必要となる。

翼表面へのセラミックを使用した熱遮蔽コーティング（TBC）の適用はタービン入口温度1700℃の温度条件下では必要不可欠な技術である。

タービン翼冷却設計を本格的に実施する場合、統一的な基本ヒートバランスを決めておく必要がある。最適システムの絞り込みが終了していない状態では、平成7年度の研究を開始するにあたり、何を参照サイクルとするかには問題があるものの、(a)サイクルとしての完成度（現状レベル）、(b)先行性、(c)中立性（再委託先独自の提案ではない）等の理由でグラーツサイクルを基本ヒートバランスにして翼冷却設計を開始した。ただし、最適システムの選定が終了した時点で、それに切り換える予定である。

（翼冷却設計前提条件）

・グラーツサイクルヒートバランス

1700℃×50bar, 500MW

→図3.5.1-11,表3.5.1-6に詳細条件を示す。

上記条件をもとにタービン翼冷却技術について再委託先である民間企業から下記4方式の提案があった。それぞれの特徴、開発意義、開発課題などを表3.5.1-8に、タービンの静翼・動翼の冷却構造を図3.5.1-12に示す。

(イ)フィルム冷却方式

(ロ)回収式内部（対流）冷却方式

(ハ)フィルム冷却＋回収式内部冷却方式

(ニ)水冷却方式／回収式内部冷却方式

第Ⅰ期の目標であるタービン冷却構造の決定のため、平成8年度に上記4方式の中間段階の絞り込みを行い、その後、モデルタービン翼の設計、製作にとりかかるスケジュールで進めてきた。

具体的には、（財）発電設備技術検査協会の中に設置された学識経験者で構成される主要構成機器開発部会において、評価項目（表3.5.1-7）と得点基準を決定した後、各提案企業からの検討結果説明会を実施し、4方式に関する評価を実施した。（表3.5.1-9）

4方式中(イ)方式は、タービン翼等の冷却が全体性能（プラント性能）に及ぼす影響の評価が十分でなく、結果として他社に比べ評価点が低かった。残り3方式（(ロ),(ハ),(ニ)）の評価点は僅差であり、かつ各冷却方式にそれぞれ特色がある技術であったので、これら3方式（(ロ),(ハ),(ニ)）を選定した。

選定された3つのタービン／翼冷却方式の動・静翼モデルを設計、製作し、(2)で製作する評価試験用燃焼器と組み合わせた冷却翼評価試験を実施した上で、平成10年度までに最適冷却方式を決定する予定である。

② ロータ冷却技術の開発

ロータ冷却技術については、主流の円周方向の圧力分布の不均一性を考慮した場合の高温主流ガスの巻き込み現象の解明とその抑制技術の開発が課題である。ロータ・ディスクの翼なしモデルによる巻き込み試験の結果、主流静圧の不均一が巻き込み量の支配的要因であることがわかった。巻き込みの発生量と発生位置は主流静圧の不均一とパターンに対応する。また、ディスク回転数の増加に伴い巻き込み量は、増加することが確認できた。

今後は、シール特性把握試験、ロータ冷却設計法のとりまとめを実施する予定である。

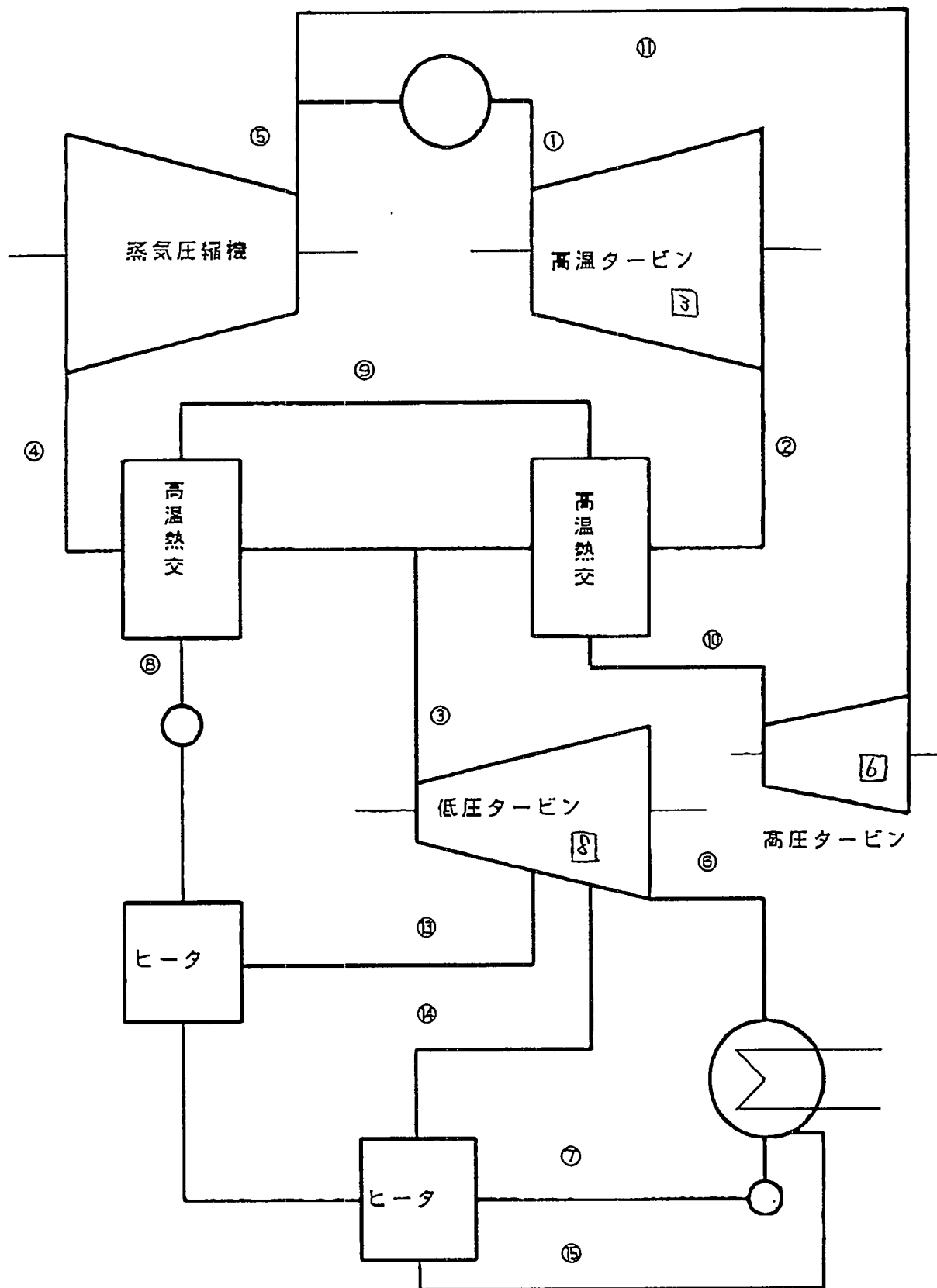


図 3.5.1-11 グラーツサイクル ヒートバランス ダイアグラム
500MW級 50 bar × 1700℃

表 3.5.1-6 グラーツサイクル

計算条件：トッピングタービン入口温度1700℃、冷却媒体割合=0%

項 目	出力(MW)
コンプレッサ	98
タービン ③	488
タービン ⑥	79
タービン ⑧	44
機械損失	5
発電機損失	8
全出力	500

発電端効率61.5%

☆⑤は燃焼器入口
☆☆⑤は圧縮機出口

番号	温度(℃)	圧力 $\left(\frac{\text{bar}}{10^5 \text{Pa}}\right)$	エンタルピー(KJ/Kg)	流量(Kg/s)
①	1700	47.5	6508	222.4
②	866	1.5	4316	222.4
③	360	1.5	3195	129.6
④	114	1.4	2701	92.8
⑤ [☆]	616	50.0	3703	171.2
⑤ ^{☆☆}	637	50.0	3752	92.8
⑥	33	0.05	2561	121.6
⑦	35	0.7	147	76.0
⑧	99	215.0	432	78.4
⑨	235	204.3	1018	78.4
⑩	851	194.0	4200	78.4
⑪	591	50.0	3646	78.4
⑫	—	—	—	—
⑬	270	0.7	3014	2.4
⑭	240	0.6	2877	5.57
⑮	75	0.6	308	5.57

3) 冷却設計	(1) 翼冷却構造図とその特長	冷却構造選定理由と特長の説明。	16
	(2) 冷媒ネットワークと流量配分		17
	(3) TBC仕様		18
	(4) 翼外面熱伝達率分布		19
	(5) 翼流入熱伝束分布		20
4) その他 総合評価	(6) 翼内面熱伝達率分布	厚さ、層構成、材料と物性値、施工法 許容温度、許容温度差、運転実績等。 算出根拠を説明ください。	21
	(7) 翼フィルム冷却効率分布	冷却方式別に算出根拠説明ください。 (フィルム冷却方式のみ)	22
	(8) 翼断面温度分布	TBC表面及びメタル内外面 (含む メタル許容温度差)	23
	(9) 翼断面冷却効率率分布	含む許容熱応力	24
	(10) 翼断面熱応力分布		25
5. 第1段階翼試験設計	(11) 翼上下プラットホーム 冷却方式と冷却効果		26
	(1) 翼材料と製造法/加工法	特徴点について説明ください。 第1段階翼試験設計結果の評価 (成立性 、問題点等) について説明ください。 (以下第1段階翼説明事項に準じる)	27
	1) 設計条件		28
	2) 空力設計	(フィルム冷却方式のみ)	29
	3) 冷却設計		30
4) その他 総合評価	(1) 空力設計のコンセプト		31
	(2) 解析コード仕様		32
	(3) 翼面流速及び圧力分布		33
	(4) 翼型全圧損失係数		34
	(5) フィルム吹き出しに依る空力 性能低下とその評価手法		35
3) 冷却設計	(1) 翼冷却構造図とその特長	回転効果を中心に説明ください。	36
	(2) 冷媒ネットワークと流量配分		37
	(3) TBC仕様		38
	(4) 翼外面熱伝達率分布	回転効果を中心に説明ください。 (フィルム冷却方式のみ)	39
	(5) 翼流入熱伝束分布		40
4) その他 総合評価	(6) 翼内面熱伝達率分布		41
	(7) 翼フィルム冷却効率分布		42
	(8) 翼断面温度分布		43
	(9) 翼断面冷却効率率分布	含む許容熱応力	44
	(10) 翼断面熱応力分布		45
6. 平成10年実施予定の モデル翼冷却試験で確認 したい技術事項	(1) 翼材料と製造法/加工法	第1段階翼試験設計結果の評価 (成立性 、問題点等) について説明ください。 試験設計に含まれる新技術内容と、平成 10年のモデル試験で確認あるいは実 証したい技術事項について説明くださ い。	46
			47

表 3.5.1-7 水素燃焼タービン概念設計の範囲について

検討基本条件

- ◎ 平成7年4月18又は20日配布のヒートバランス（基本HB）に基き検討ください。
 なお以下の記述では各タービンの名称は基本HBと同一とします。
 ◎ 各再委託先は試設計による、平成7年度末での最終方針を提示ください。

水素燃焼タービンの開発
 主要構成機器開発部会

小項目
 連番

大項目	中項目	小項目	説明事項	NO
1. 高温蒸気特性及び物性値			試設計に使用した蒸気特性及び物性の根拠を説明ください。	1
2. 高温タービンプレーム設計	1) 流路設計	(1) 流路形状と主要寸法	段数構成、軸回転数、各段基本直径翼高さ及び枚数及び軸長等について説明ください。	2
	2) 高温タービン性能と冷却方式	(2) フローパターンの特長		3
		(1) 冷却方式と冷却媒体量	各段冷却方式と合計冷却媒体量及び各段冷媒配分について説明ください。	4
		(2) 冷却方式選定根拠	上記各段冷却方式選定の根拠を説明ください。	5
		(3) サイクル効率の評価	提案の冷却方式を高温タービンに適用した場合の、基本HBのサイクル効率の値について説明ください。 （高温タービン入口流量一定で検討ください。）	6
		(4) 高温タービン熱バランス	冷却効果を考慮した、高温タービンの入出熱バランスを説明ください。	7
	3) 回転体軸系構成	(1) 高温タービン／蒸気圧縮機軸系構成	必要なら高圧及び低圧タービン軸系を含めて説明ください。	8
3. 冷却システム試設計	1) システム系統計画		高温タービンの冷却実現に必要な冷却媒体の供給／回収システムを説明ください	9
4. 第1段静翼試設計	1) 設計条件		翼設計条件を説明ください。	10
	2) 空力設計	(1) 空力設計のコンセプト	設計コンセプトについて説明ください	11
		(2) 解析コード仕様	2D、圧縮性、粘性流等解析コードの概略仕様を説明ください。	12
		(3) 翼面流速及び圧力分布		13
		(4) 翼型全圧損失係数	算出根拠を説明ください。	14
		(5) フィルム吹き出しに依る空力性能低下とその評価手法	（フィルム冷却方式のみ）	15

図 3.5.1-12 翼冷却構造図

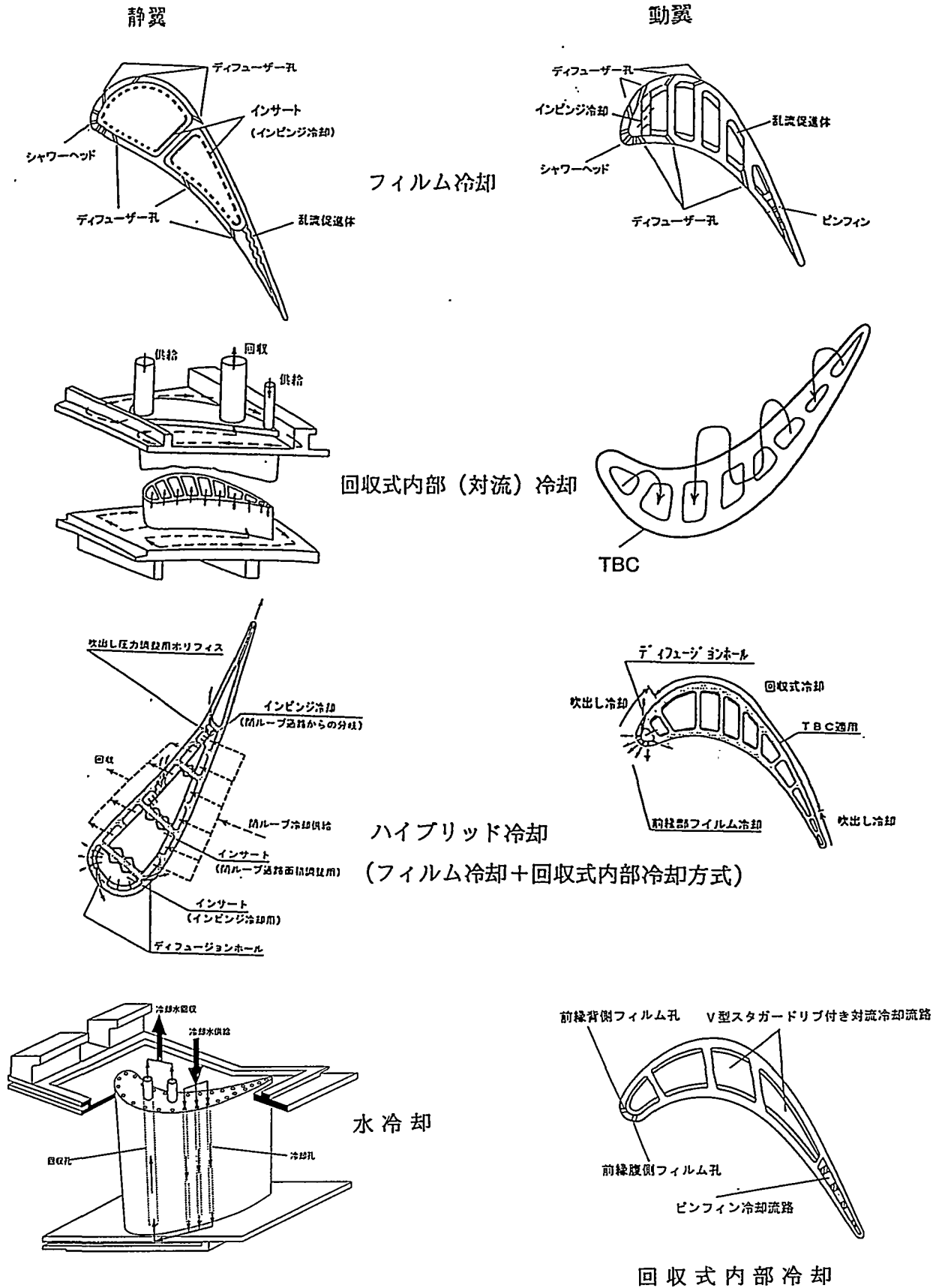


表 3.5.1-8

翼冷却方式の比較

冷却方式	特 徴	開 発 意 義	第 1 期 での 開発課題	備 考
フィルム冷却	冷媒の吹き出しにより、翼外面に低温のフィルム膜を形成し、翼に流入する熱量を低減する冷却方式。 通常吹き出し冷媒は内部冷却後のものを使用する。	主として航空エンジン分野で発展してきた技術で、従来は陸用（発電）大型GTもこの先行技術を導入してきた。しかし主流ガス温度が1700℃級ではサイクル性能上下記の方式に太刀打ち出来ない。	フィルム効率の向上 フィルム形成条件の最適化	大量の吹き出しを行うことは、高温主流ガスの温度を低下させ、結果としてサイクル性能が低下する。主流ガス温度が高温になる程、本方式の適用については全体性能の慎重な検討が必要となる。
回収式内部（対流）冷却	翼内面側の熱伝達率を飛躍的に向上させる事により、翼外面から流入する熱量を制限せずに、翼冷却を成立させる方式。吹き出しが無いため冷却媒体は全量回収される。	冷媒の吹き出しによる高温ガスの温度低下が無いため、フィルム冷却方式に比べ、サイクル性能の大幅な向上が期待できる。	従来からの翼内面冷却方式（例えばインピンジメント冷却）等 に比べ、更に伝熱性能が優れた翼内面冷却方式を開発する必要がある。	翼内面伝熱促進技術としてはサーペンタイン流路+斜めタービュレーター等が現状の要素技術開発候補
ハイブリット冷却 （フィルム冷却 + 回収式内部冷却）	フィルム冷却と回収式内部冷却を併用する方式。フィルム冷却は翼外面の熱負荷の特に高い所に適用する。	サイクル性能的には回収式内部冷却方式にやや劣るものの、翼外面の高熱負荷部にフィルム冷却方式を適用するため、実現性に期待がもてる。	フィルム冷却の吹き出し量の低減（効率的フィルム冷却の確立）と翼内面伝熱性能促進技術の開発。	フィルム冷却と回収式内部冷却を併用する方式のため如何にフィルム冷却量を低減するかが課題。
水冷却	回収式内部冷却で冷却媒体として比熱の大きい水を使用する方式。	蒸気を冷媒とした回収式内部冷却方式より、更なるサイクル性能の向上が期待できる。 反面開発リスクは大きい。	翼断面の均一冷却（熱応力の低減）と熱伝導性に優れた翼材料の選択。 従来の冷却翼設計概念に縛られない自由な発想が必要。	先行開発例（外国）の調査と対策の立案 概略の比熱比 空気、水蒸気、水 1 2 4

表3.5.1-9 翼冷却方式の評価結果

方式	得点	部会付帯意見
(イ) フィルム冷却方式	54.4	膜冷却技術、空力設計技術等の要素技術開発能力に優れたものがあり、何らかの形で本プロジェクトへの継続寄与を期待したい。
(ロ) 回収式内部冷却方式	72.5	蒸気完全回収型冷却方式による第1段動／静翼の開発を期待する。モデル翼冷却試験は、動／静翼に完全回収型冷却方式を適用する方向での開発が望まれる。
(ハ) フィルム冷却＋ 回収式内部冷却方式 (ハイブリッド)	71.7	ハイブリッド冷却方式により達成可能な高温タービン性能を明確にすると共に、この冷却条件での第1段動／静翼の開発を期待する。モデル翼冷却試験では、設定した冷却条件でのハイブリッド冷却方式の実証が望まれる。
(ニ) 水冷却方式／ 回収式内部冷却方式	74.5	水冷却方式の国内外先行研究開発例に関する問題点の把握とこれに対するブレイクスルー方を立案のうえ、モデル翼冷却試験では提案の第1段動／静翼冷却方式、特に静翼水冷却方式の実証が望まれる。

注) 得点は、100点満点を基準とした値である。

(4) 主要補機類の開発

① 液体水素冷熱利用技術の開発

水素燃焼タービンプラント（500MW級／基）に適用される水素・酸素供給（水素気化／酸素製造）システムについて調査及び概念設計を行った。酸素製造システムは、水素の冷熱を利用した空気からの深冷分離法を採用している。

(a) 気化システム

液体水素用気化器として、図3.5.1-13に示す海水使用のオープンラック方式を選定し、構造として基本的にはLNG気化器が適用できることを確認した。また、液体水素冷熱取り出し用熱交換器型式として、図3.5.1-14に示す4形式を検討し、プレートフィン方式及び二重管方式が適用できることを確認し、基本的構造の検討を実施した。

(b) 酸素製造システム

酸素製造システムの動力原単位の低減を目的として、図3.5.1-15に示すシングルカラム方式について検討した結果、動力原単位は、約 0.32kWh/Nm^3 程度まで低減でき、大幅な省エネが達成できた。さらに動力原単位の低減を図るため、図3.5.1-16に示すダブルカラム方式について検討し、現状では約 0.28kWh/Nm^3 の結果を得ているが、引き続き検討を進める予定である。

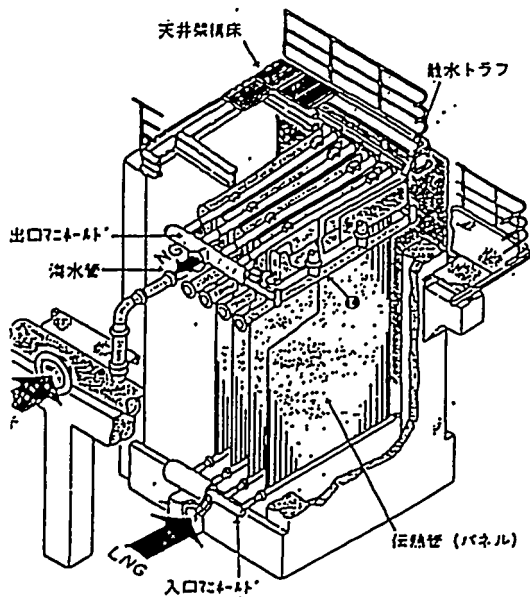
今後は、水素・酸素供給システムにおける主要構成機器の仕様、プロットプラン（機器等の配置図）、プラント経済性（供給ガス単価）等を検討し、成立性（実現可能性）の評価及び開発課題の抽出を行う。

② 高温熱交換器の開発

水素燃焼タービンプラント（500MW級／基）に適用される高温熱交換器について調査及び概念設計を行った。図3.5.1-17に示すように、トッピング再生サイクル用高温熱交換器及び新ランキンサイクル用蒸気発生器の概略仕様及び主要寸法について検討した。

今後は、500MW級／基プラント熱交換器の概念設計を行い、主要構成機器の仕様、高温熱交換器のプロットプラン、設計製作費等を検討し、成立性（実現可能性）の評価及び開発課題の抽出を行う。

気化システム



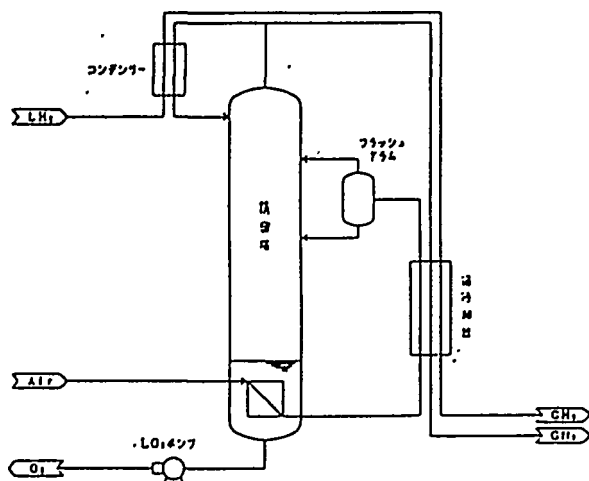
オープンラック式気化器の構造例

図 3.5.1-13

熱交換器の形式	プレートフィン式 (P F V)	バスコイル式	中間媒体式	二段管式
所要面積比	1	~1.5	2	1
H_2 酸化防止策	N_2/H_2 間に伝熱抵抗を設ける。	N_2-H_2 の熱交換は中間媒体を介して行う。	N_2-H_2 の熱交換は中間媒体を介して行う。	加温された H_2 自身が伝熱抵抗になる。
特徴/課題	単位体積当たりの伝熱面積が大きい。流体間の温度差を大きくすることが必要。	中間媒体が単相なので大きな伝熱係数は得られない。	伝熱係数を大きくするためには、飽和状態になる中間媒体が必要。	管形なので所要面積が小さい。中間媒体は不要。

図 3.5.1-14 冷熱取出用熱交換器の形式比較

酸素製造システム



シングルカラム方式 概略システム

図 3.5.1-15

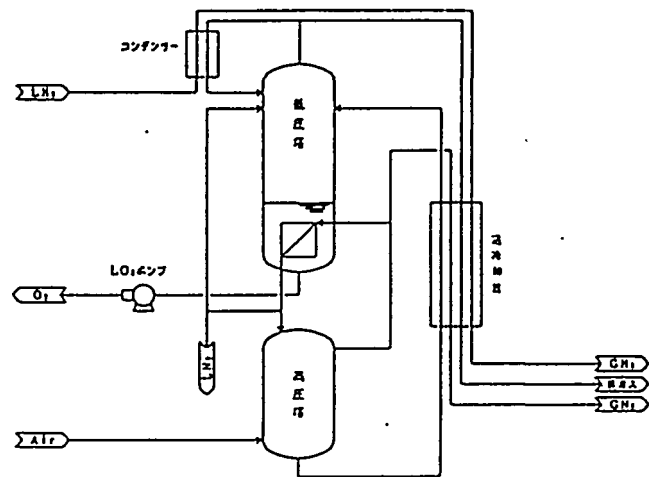
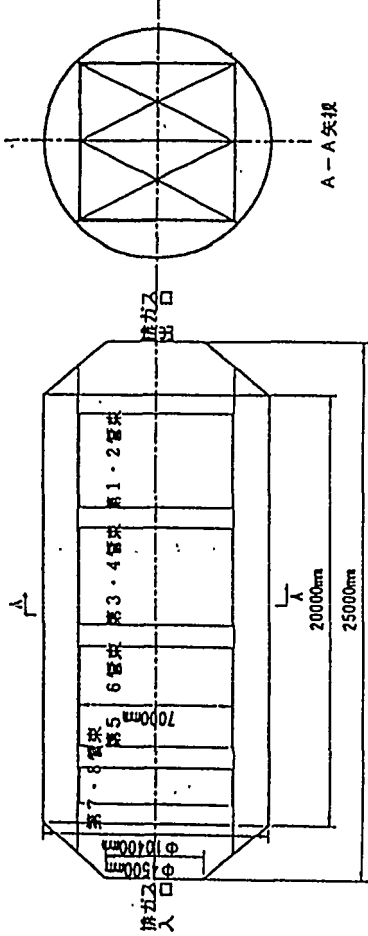


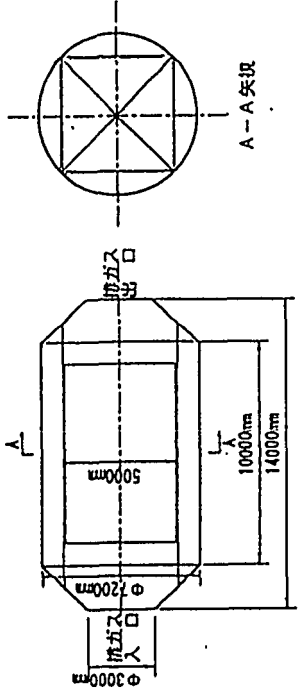
図 3.5.1-16 ダブルカラム方式 概略システム

熱交換器の設計仕様

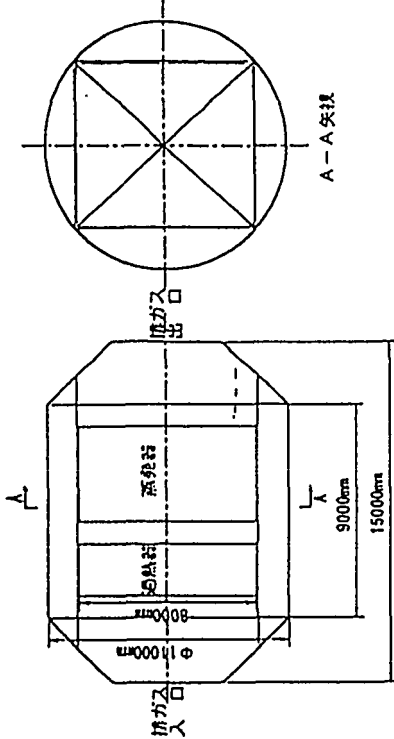
	新ランキンサイクル		グラーツサイクル	
	蒸気発生器 (HRSG)		高温熱交換器-1 (蒸発器)	高温熱交換器-2 (凝結器・過熱器)
加熱流体 (鋼側)	入口温度 (C)	1129		
	出口温度 (C)	148		
	入口圧力 (ata)	1.4	1.5	1.5
	出口圧力 (ata)	1.3	1.4	1.5
	流量 (kg/s)	156.1	92.8	222.4
被加熱流体 (管側)	許容圧力損失 (kg/cm ²)	0.1	0.1	0.0
	入口温度 (C)	128	99	235
	出口温度 (C)	750	235	851
	入口圧力 (ata)	368.4	219	208
	出口圧力 (ata)	350.0	208	198
熱負荷 (MW)	流量 (kg/s)	104.1	78.4	78.4
	許容圧力損失 (kg/cm ²)	18.4	10.9	10.5
		343	46	249



新ランキンサイクル用蒸気発生器概念図



グラーツサイクル用高温熱交換器-1 概念図



グラーツサイクル用高温熱交換器-2 概念図

(5)超高温材料の開発

タービン入口温度2000℃を目標に、水素燃焼タービンへの適用可能性が期待される耐熱超合金、金属間化合物、セラミック系複合材料及び炭素系複合材料を対象に超高温材料の設計・開発を行う。さらに、これらの超高温材料の試験・評価法を開発及び標準化し、設計・開発した超高温材料の試験・評価を行い、その耐用限界・条件、実用化への技術的課題を明らかにする。

平成5年度から平成8年度までの研究計画として、4種類の材料を選定して材料設計開発、材料試験評価を行った。

(a)耐熱合金 : SC合金+FR Cハイブリッド翼

(b)耐熱合金 : ODS合金+TBC

(c)金属間化合物 : MoSi₂

(d)セラミック系複合材料 : SiC長繊維/SiC

(e)セラミック系複合材料 : 多重構造セラミックス

(f)炭素系複合材料 : C/C複合材料

SC : 単結晶 FR C : 繊維強化セラミック

ODS : 酸化物分散強化 TBC : 遮熱コーティング

① 材料設計開発の成果

平成5年度については、4種類の超高温材料について考えられる技術開発課題を抽出した。(表3.5.1-10参照)

平成6年度から8年度において、材料設計開発、材料試験評価を行った。

各材料の開発並びに試験・評価の成果を以下に示す

(a)耐熱合金 : SC合金+FR Cハイブリッド翼

高温強度耐熱性の向上のため、我が国(金属材料技術研究所)で開発されたTMS63Mod.の単結晶合金をベースにCr無添加合金を8種類試作し、耐酸化性を低下させず、熱処理の最適化により高強度化できる見通しを得た。

SiC/有機ハイブリッド織物を用いた冷却孔の形成の他、小径孔形成ピンにより良好な冷却孔を形成した。これによりハイブリッド翼において、SC合金コアに装着する多孔質FR Cシェルを成形するための基礎的な方式に見通し

を得た。

(b)耐熱合金：ODS合金+TBC

耐熱性の向上のため、セラミックス遮熱コーティングのみを多孔質にしたモデルを考案し、そのモデルによるコーティングを試作し流量特性を評価した。また、コーティングとODS合金を接合させるためのボンドの材料候補として、耐環境性からCoCrAlYを選定した。

(c)金属間化合物：MoSi₂

多種ある金属間化合物の中から耐熱性と耐酸化性に優れたMoSi₂を選定し、その機械的性質、耐環境性をさらに向上させる添加元素を検討してRe, W, Alの3元素を選定し、配合組成を決定した。

製造プロセスとしてホットプレスを採用して試料の作製を行い、高温圧縮試験(1600℃)、高温耐酸化試験(1700℃)を実施し、その基本特性を評価した。

(d)セラミック系複合材料：SiC長繊維/SiC

BNをコーティングしたSiC繊維と緻密化処理したSiCマトリックスによりセラミック系複合材料(CMC)を試作し、1200℃の曲げ試験を行い高強度、高耐熱性を確認した。

Al₂O₃、ZrO₂及びY₂O₃によるコーティング材を試作し、1300℃での大気中加熱試験を行ってAl₂O₃の耐酸化特性が最もよいことを確認した。

(e)セラミック系複合材料：多重構造セラミックス

芯部、中間部、表面部からなる多重構造概念を考案するとともに、破壊検知機能を持たせるため、導電性材を分散させたCMCを試作し、電気抵抗変化による亀裂検出の可能性を確認した。

Al₂O₃等のコーティング膜を試作し、水蒸気/水素高温環境下腐食試験方法を用いて耐食性を評価した。

(f)炭素系複合材料：C/C複合材料

C/C複合材料用の強化繊維候補材を選定し、3種類の繊維配向で3次元織物構造のテストピースを試作した。これにより、3次元織複合材料の成形法の見通しを得た。

強化繊維及びマトリックス候補材としてAl₂O₃を選定し、CMCによる3次元織複合材料を試作し、熱衝撃性を評価した。

② 材料試験評価法の開発・標準化の成果

平成５年度は、超高温材料の基本特性（力学特性、化学特性、物理特性）を試験・評価する手法の標準化に必要な技術課題を抽出した。（表3.5.1-11）平成６年度から８年度において、既製材料を用いた各特性の試験・評価を実施し、試験法の改良を行った。

（a）力学特性

既製のC/C材による1600℃での繰り返し荷重試験が可能なことを確認した。

（b）化学特性

超高温水蒸気/水素環境下腐食試験に用いる加熱方式の適用可能性を確認した。

（c）物理特性

熱的特性（熱拡散率、比熱、放射率）測定法については、温度測定等の改善を行いそれぞれ1900℃、1700℃及び1500℃まで測定できることを確認した。

高温X線回折に用いる炭素系ヒーターの実用化検討ならびに導電性材料への直接通電加熱の適用可能性を確認した。これにより、真空あるいは1気圧不活性ガス中でX線構造解析が可能となった。

③ 今後の予定

平成９年度、平成１０年度に残された課題を、表3.5.1-10、表3.5.1-11に示した。材料設計開発に関しては、引き続き各対象材料の試作・評価を行い各材料の耐用限界・条件と実用化への技術的課題を明らかにする。また、材料試験評価法のうち、力学特性と物理特性については試験評価法の標準化を行う。化学特性については、水蒸気雰囲気耐久試験法（1800℃，１気圧）を開発する予定である。

表 3.5.1-10 超高温材料の設計・開発に関する第 I 期の成果と残された課題

	SC合金+ FRCハイブリット翼	ODS合金+TBC	MoSi ₂	CMC (SiC長繊維/SiC)	CMC (多重構造セラミックス)	3次元繊維複合材料 (C/C・CMC)
ターゲット	動翼 ○	-	-	○	○	○
	静翼 ○	○	○	○	○	○
	燃焼器 -	○	○	○	○	○
Ti/T2000℃に適用 するための構造 上(設計・製作) および使用 上の条件(冷却・ 加工・成形性、 耐久性、耐環境性、 その他)	SCをコア(SPAR)に、 多孔質断熱SHELLに FRCを用いた冷却構造 を採用。	遮熱コーティングを利 用したトランスミブレ- ション冷却構造(ODS 合金の材料温度:1000 ~1100℃)を採用。冷 却空気が必要。静翼の 冷却構造加工後、ODS 合金の拡散接合による 成形が必要。	ΔT=100~300℃程度 の冷却構造(2000℃)。 1800℃以下の温度領域 の静止部材では無冷却 使用の可能性あり。粉 末冶金で任意形状部品 を製造。耐環境性に優 れており耐食コーティ ングは不要。	無冷却(~1700℃)ま たは極めて弱い冷却 (1700~2000℃)で使 用。材料的には母材技 術と繊維-母材界面技 術の改善と耐環境性 コーティング技術の確 立により、2000℃級の 耐熱性が達成可能。こ れにより部品形状の単 純化、熱応力の低減が 可能。	多重構造の内部は機械 的特性に優れる非酸化 物系CMC、外部は耐 酸化性に優れる高融点 酸化物系CMC。繊維 の構造は2~3次元構造 でインジペンシ付与。 表面部冷却は原則とし て不要。材料芯部の冷 却は必要。加工を必要 としないゴッドシェイプ を指す。連続運転 1万時間以上で高温水 蒸気雰囲気での使用。	C/C:加工性は良。成形性 は難。冷却構造は不要。 遮熱構造は不要。耐久性 は2000℃に於ける安定性 良好。耐環境性は500℃以 上の耐酸化性不良。耐酸 化コーティングが必要。 CMC:加工性は難。成形 性は難。冷却構造はΔT= 300℃の冷却要。遮熱構造 は不要。耐熱温度は最高 1700℃。非酸化物系材料 は耐酸化性不良。耐酸化 コーティングが必要。
平成5年度の 抽出課題	●H ₂ O/H ₂ 雰囲気中の 腐食挙動の解明 ●高強度繊維及び単結 晶超合金の開発 ●薄肉・中空繊維/FRC の製造技術 ●大型・複雑冷却翼の 製造技術	●翼/結合層/コーティング・材 料の設計・開発・選定 ●TBC技術 ●冷却翼/微細冷却穴 等加工技術	●超高温H ₂ O/H ₂ 雰囲気 下での特性評価 ●高強度・高延性化 ●実部材への適用性検 討/製造技術の確立	●繊維・母材の耐熱性・ 向上と界面の耐熱性・ 耐環境性の向上 ●耐食コーティング技術の 開発・材料選定、コーティ ング設計(傾斜組織)、 コーティングプロセス、界面の 熱応力解析	●高強度・高塑性芯部 材料、高耐熱・高耐熱 中間材料、高耐食表面 材料(傾斜組織等)の開 発 ●中間部、芯部への自 己診断機能の付与	●最適設計技術および比 強度等の特性向上 ●異方性を加味した解析 技術 ●耐酸化コーティングの 開発
これまでの成果	C:無添加SCの開発と 多孔FRCフェーズ成形に 見通し。	テストピースレベルで 多孔質セラミックス溶 射皮膜の作製に見通 し。	MoSi ₂ にAlを添加した 合金が有望であること を確認。	繊維の定比性化と母材 の高密度化でCMCと しては高温高強度化を 達成。耐環境コーティ ング基礎技術確立。	セラミックス系多重構造材料 の芯部材料研究を行い 破壊検知機能を付与し たCMCを開発。その 破壊検知機能の確認。	共に3次元繊維複合材料の製 作が可能。C/Cは2000℃で の曲げ強度の取得、CMC は3耐熱衝撃性のデータ取 得済。
第 I 期に 残された課題	SCは成分と熱処理の 最適化、FRCは冷却孔 のコントロール性評 価。	冷却特性試験による最 適構造の選定。	強度評価、高温水蒸気 雰囲気での耐環境性評 価、最適組成の選定。	繊維-母材界面制御、 CMC-耐環境コーティ ング界面制御と長時間安定 性の評価。	機械的特性(室温/高 温、強度/塑性)に着 目した芯部材料の選 定。	C/Cは基本特性のデータ整 備。CMCは材料系の選 択、製造法の確立と基本 特性データ整備。

表 3.5.1-11 超高温材料の試験・評価に関する第Ⅰ期の成果と残された課題

平成5年度の抽出課題 ●力学特性： ・引張試験における温度測定法の確立 ・クリープ試験における歪測定法の確立 ・超高温複合環境下における破壊挙動解明のための試験・解析技術の確立 ●化学特性： ・超高温水蒸気／水素雰囲気試験設備の開発 ●物理特性： ・熱物性測定用設備の改良 ・材質評価のための高温X線回折における材料加熱方法の確立	これまでの成果 ●力学特性： 静強度（引張・圧縮・曲げ）、疲労、クリープ強度は真空1気圧不活性ガス中で評価可能なことを確認した。 ●化学特性： 超高温水蒸気／水素環境下腐食試験に用いる加熱方式の適用可能性を確認。ただし、本プロジェクト想定雰囲気（2000℃、100気圧、100%水蒸気）での材料耐久性を評価できる段階にない。 ●物理特性： X線構造解析は真空1気圧不活性ガス中で評価可能なことを確認。熱拡散率は1900℃まで、比熱は約1700℃まで評価可能（それ以上の温度域は加熱炉更新が必要）。放射率は1500℃まで真空雰囲気中で測定可能（これ以上の温度域は新規設備が必要）。	第Ⅰ期に残された課題 ●力学特性： 上記特性については平成10年度を目標に標準化を進める。 ●化学特性： 水蒸気雰囲気耐久性試験法（1800℃、1気圧、100%水蒸気）については平成10年度を目標に開発する。 ●物理特性： 熱拡散率、比熱は温度域を除けば通常材料の場合標準化レベルに達している。特殊形状材料（薄膜等）については、平成10年度目標に標準化を進める。放射率は金属材料について平成10年度目標に標準化を進める。
---	---	--

3. 5. 2 その他の利用技術

水素燃焼タービンは、大規模な水素利用技術の中心となることが期待されるが、研究開発の端緒についたところであり、商業ベースの実現までには、相当の年月がかかると考えられる(2030年頃を想定)。他方、水素エネルギーについては、動力、輸送などの分野で様々な用途が提案されている。

水素エネルギー社会は、社会・経済の変化とともに段階的に実現されていくと考えられるので、水素の導入過程において、水素のメリットを享受できる多様な水素利用形態のオプションを提示できることが重要である。また、水素の円滑な導入を促進するため、実際の利用形態において発生すると予想される各種の問題点の抽出・検討を予め行っておく必要がある。

このため、水素燃焼タービン以外の有望なその他の利用技術を洗い出し、それらの得失を検討した。さらに、導入時に生じる各種の問題点を抽出するための予備検討として、都市への水素供給システムを想定し、水素エネルギーを導入する場合に生じる効果及び水素の受入・供給方法に関する検討を行った。

(1) 有望な水素利用技術の検討

水素の利用分野として、①動力発生、②輸送機関、③酸水素利用燃料電池及び④冷熱利用の4分野を選び、それぞれの分野における利用技術の得失を検討した。動力発生、輸送機関及び酸水素利用燃料電池は、いずれも水素と酸素を反応させることにより高効率化、無公害化等のメリットを享受できると考えられる分野である。また、液体水素の冷熱利用も、エネルギーの有効利用を考える上で重要な分野である。

検討に当たっては、各分野で考えられる水素利用技術を候補として挙げ、各技術について水素利用によって生じる得失を明らかにするよう努めた。

① 動力発生

定置式の動力発生システムとして、水素を燃料とするコージェネレーションシステムを対象とし、クローズド循環型水素／酸素ディーゼルエンジン、オープン空気燃焼エンジン及びスターリングエンジンの3種類の動力発生方

式について、それらの特徴と技術開発課題等について検討した。(表3.5.2-1)

これら3種類の動力発生方式のうち、規模の範囲が広く、比較的技術障壁が低いと見込まれるクローズド循環型水素／酸素ディーゼルエンジンを選択し、その基本性能について机上検討を行った。なお、本システムは中規模の水素需要に対応できるので、ある程度まとまった量の水素の供給システムが整備されれば、導入が可能となる。くわえて、短期間(約7年程度)かつ少額の開発費(約10億円)で基礎試験を完了し、実証試験に入ることができると思込まれるため、早期の実用化も期待できる。

本システムと既存の水素を利用しないコージェネレーションシステムとの比較を表3.5.2-2に示す。本システムは、液体水素の冷熱エネルギーによって製造した純粋酸素を酸化剤とすることにより、高効率かつ超クリーンという画期的な特徴を有する。また、水蒸気や単原子ガスを作動ガスとして循環させるため、効率的なエネルギー回収を行うことができ、高い総合効率となる。

以下に、クローズド循環型水素／酸素ディーゼルエンジンの性能を予測するために実施した机上検討の結果を示す。

(クローズド循環型水素／酸素ディーゼルエンジンの性能の予測結果)

ディーゼルサイクルによる高効率化を狙うとともに、水素・酸素燃焼による完全無公害化を目的とするシステムである(図3.5.2-1参照)。作動ガスの種類により単原子作動ガス循環型と水蒸気循環型の2方式を考えた。

このうち、単原子作動ガス循環型は、比熱比の高い単原子ガス(アルゴン)を使用することにより、高い発電効率を得ることができることに加え、構造を単純化できる。水蒸気循環型は、排気タービンによるエネルギーを効率良く回収し、高い総合効率を得ることができる。

また、これらの2方式について、作動ガス中に N_2 、Ar等の不純物が混入した場合の影響についても検討した。単原子作動ガス循環型は、単原子ガスの高い比熱比により高い熱効率を実現するものであり、作動ガス中の N_2 濃度を10%程度に押さえれば、熱効率の低下を1%程度に押さえられると思込まれる。水蒸気循環型では、 N_2 、Ar等の不純物の混入により比熱比が向上する反面、余剰ガスの排出に用いる真空ポンプの動力が必要となり、これらがほぼ

バランスして熱効率に大きな変化はみられないものと見込まれる。

今後は、クローズド循環型水素／酸素ディーゼルについて、要素技術研究を行い、コージェネレーションシステムとしての概念設計を実施する。

表3.5.2-1 各種動力発生方式の比較

分類	方式	作動ガス	燃焼方式	特徴	予測性能	技術課題
クローズド循環型水素／酸素ディーゼル	単原子作動ガス循環型ディーゼルエンジン	単原子ガス (He又はArガス)	高圧噴射 拡散燃焼	単原子作動ガスによるサイクル効率向上	出力600kW 効率44.5% (発電端高位37.5%) NO _x =0	・高圧水素噴射 ・着火方式 ・タービン拡散燃焼(Arガス中) ・作動ガスシール ・高温部材 ・排ガス凝縮技術
	水蒸気循環型ディーゼルエンジン	水蒸気	高圧噴射 拡散燃焼	水蒸気顕熱の高温回収等によるコージェネ総合効率の向上	出力1000kW 効率49.9% (発電端高位42%) コージェネ87% NO _x =0	・高圧水素噴射 ・着火方式 ・タービン拡散燃焼(水蒸気中) ・シール技術 ・高温水蒸気タービン翼材料 ・起動時蒸気圧力制御
オープン空気燃焼	過給希薄燃焼型ロータリーエンジン	空気	予混合 火花点火	過給希薄燃焼による高出力高効率化、低NO _x 化	出力40~50kW 効率30% コージェネ80% NO _x <100ppm	・過給、希薄燃焼の最適化 ・長時間耐久性
	2サイクルユニフロー式副室噴射希薄燃焼エンジン	空気	副室内 低圧噴射	副室式希薄燃焼による高効率化、低NO _x 化	効率30% NO _x 数10ppm	・電子制御式筒内噴射装置 ・筒内混合気形成最適化
スタターリング	水素・酸素内燃式スタターリングエンジン	水素又はヘリウム	触媒燃焼	内燃式触媒燃焼による熱交換器小型化、高効率、低公害化	出力100kW 効率40%程度 NO _x =0	・触媒燃焼の高性能化 ・再生器の小型化 ・高性能化 ・高温部断熱化

表3.5.2-2 既存のコージェネレーションシステムとの比較

	ダイーゼル	ガスタービ	ガスエンジン	セラミック燃料タービン	水素/酸素燃料タービン
発電効率 (LHV)	42%	37%程度	37%程度	42%以上	(4)
総合効率 (LHV)	80%程度	80%程度	80%程度	——	(5)
NOx [ppm]	50～300	100以下	150以下	法令基準値以下	なし
SOx [ppm]	数100	低い	低い	法令基準値以下	なし
CO ₂ [kg]	630	440	440	法令基準値以下	なし
ばいじん	あり	あり(微量)	あり(微量)	法令基準値以下	なし
課題	NOx対策コスト、規模	NOx対策コスト、規模	NOx対策コスト、規模	現在開発中	水素噴射、水素着火法

(1) : NOx対策後の値。NOxは、燃焼温度、NOx対策により異なる。また、NOx対策でコスト等を無視すればかなり低減可能。

出典「クリーンエネルギー10月増刊号」(編)クリーンエネルギー編集委員会 発行：日本工業出版(株)

(2) : SOxは、燃料の硫黄分により異なる。一般的にダイーゼル燃料の硫黄分は高く、天然ガスは、硫黄分が少ないので、ガスタービン、ガスエンジンのSOx値は低い。

(3) : 1000kWh発電でのCO₂排出量(発電効率40%時)

(4) : ニューサレンサイの計画の一環として当機構が実施しているセラミック燃料タービン技術開発の目標値

(5) : 当機構の研究開発は、エンジン単体の開発を主目的とし、熱回収を含めた総合効率については研究対象外

(6) : 水蒸気循環型ダイーゼルエンジンについての試算値

② 輸送機関

輸送機関のうち、航空機、船舶等と比較して、普及効果及び実現性が高いと見込まれる自動車に対象を絞り検討を実施した。

水素自動車は、水素を燃料とし、排ガスは、CO₂フリーであるため、地球環境問題に対応した無排出自動車（ゼロ・エミッション・ビークル（ZEV））を実現できる。水素自動車については、我が国を含めた先進各国において1970年代から開発が始められている。国内では、武蔵工業大学、工業技術院機械技術研究所、マツダ株式会社等、諸外国では、北米、欧州を中心に試作車が製作され、走行テストを含めた性能評価がなされている。開発が進んでいる水素自動車には、複数の動力発生方式が存在し、それぞれ特徴を有するため、水素利用社会に適合する水素自動車としてどの方式が適しているか等について検討する必要がある。

このため、自動車の動力方式として有望な水素エンジンと燃料電池の性能を比較した。具体的には、大型の水素自動車であるミニバスの目標仕様を作成し、水素エンジンと燃料電池をそれぞれ動力方式として用いた場合、目標仕様を達成できるかどうか、達成できないとすればどの項目か、について性能分析を行うこととした。なお、ミニバスの仕様は、現在開発が進められている電気自動車の仕様を勘案して作成した。

さらに、水素自動車の普及を考える上で不可欠な水素供給ステーションの概念設計を行った。なお、水素自動車へ燃料電池を応用した場合の性能上の問題点の検討については、③酸水素利用燃料電池で検討した。ここでの検討は、自動車用燃料電池に適した特性を持つ固体高分子型燃料電池使用を前提としている。

(a) 水素自動車（ミニバス）

目標仕様（表3.5.2-3）を作成し、水素エンジン車と燃料電池車の性能が仕様を満足するかどうか検討した。

ミニバスを対象としたのは、以下の理由からである。

- ・燃料電池は、水素エンジンと比較して占有容積が大きく、小型自動車を検

討対象にすると不利になる。これに対し、ミニバスは、構造上余裕があるため、占有容積の大小を問題にすることは少なく、水素エンジンと燃料電池を同一条件で検討できる。

- ・現状のミニバスの多くはディーゼルエンジンを搭載しており、これを水素自動車に置き換えることができれば、ディーゼルエンジン特有の微粒子等の排出を抑えることができ、環境改善の効果が見込まれる。
- ・初期の水素自動車の導入は、公共輸送機関への先導的導入が主体になると予想され、代表的な公共輸送機関であるバスは、初期導入の検討対象として適している。
- ・技術的に共通点を有する電気自動車では、ミニバスについての検討が進んでおり、電気自動車で得られた知見を活用することができる。

検討の結果、現状のエンジン効率と水素貯蔵量を考慮した場合、水素エンジン車では走行距離の条件、燃料電池車では総重量の条件を満足するのが困難なことが明らかになった。

さらに、これらの問題を解決するため、動力方式のハイブリッド化について検討した。対象としたハイブリッド車は、(イ)燃料電池＋二次電池、(ロ)水素エンジン＋二次電池の二つの方式である。前者は、燃料電池自体の性能、燃料電池と二次電池の組合せの最適化等の課題があり、後者では、水素エンジン自体の高効率化・ゼロエミッション化、水素エンジンと排熱回収の組合せの最適化等の課題が存在することが判明した。また、(イ)と(ロ)に共通の課題として、燃料タンク性能の向上が必要であることが判明した。

なお、水素エンジンの場合は、燃料電池と比較して占有容積が小さいため、小型自動車に適用した場合についても今後検討する必要がある。

表3-5-2.3 水素自動車（ミニバス）の目標仕様

設定 目標値	総重量	5 ton程度
	定員	20人以上
	最高速度	120km/h以上
	走行距離	300km以上(60km/h 定速走行時)
	水素貯蔵量	7.5kg(燃費40km/kgH ₂ : 60km/h 定速走行時)
	排気ガス	有害排出物を排出しない(ZEV)又はこれと等価(EZEV)

(b)水素供給ステーション

水素自動車のための水素供給ステーションについて試設計を行い、液体水素タンク及びそのボイルオフガスを貯蔵するタンク配置を想定し、関係する法規制にも対応しつつ各種構成設備、設備配置等を検討した。その結果、水素ステーションに実際に建設する設備の断熱性、ボイルオフガスの処理、水素充填装置（ディスペンサー）や自動車と充填装置との接合部（クイックカップリング）等に関する技術的検討が必要であることが明らかとなった。

上記(a)及び(b)の検討を踏まえ、 今後は、自動車については、①水素エンジン＋二次電池、②燃料電池＋二次電池を動力方式としたハイブリッド化の概念設計を行う。また、水素供給ステーションについても機器等の概念設計

を含めた技術的検討を行う予定である。

③酸水素利用燃料電池

現在、研究開発に取り組まれている各種の燃料電池について、水素の直接利用の得失を検討した。また、水素の直接利用のメリットが見込まれる燃料電池については、各種の用途に適用した場合の性能検討を行った。

(a)各種燃料電池の比較・検討

燃料電池において、純粹の水素をそのまま燃料にできれば、天然ガス等の改質装置が不要となり、設備コストの低減、効率の向上、操作性の向上及び設備面積の低減が見込まれると期待される。また、液体水素の冷熱エネルギーを利用して酸素を製造し、これを燃料電池の酸化剤として利用することにより、発電効率を向上させることも可能である。表3-5-2.4に各種燃料電池に水素を燃料として使用した場合の比較結果を示す。

水素の直接利用を考えた場合、もともと水素利用を前提に開発されているアルカリ型は別として、低温作動型の固体高分子型及びリン酸型は、改質装置が不要となり、設備コスト、設備容量等が低減でき、発電効率も向上する。

また、固体高分子型では、COをppmオーダーまで除去する装置も不要となる。

一方、熔融炭酸塩型及び固体電解質型は、高温運転のため起動時間が長いのが欠点である。化石燃料を使用した場合には、化石燃料の内部改質が可能であることや、COの影響が無い等の高温運転の特長を活かすことができるが、水素を燃料として使用した場合は、この特長を活かすことができない。

これらのことから、水素の直接利用によるメリットは、リン酸型と固体高分子型で期待できるとの結論を得た。このうち、リン酸型については、最も実用化段階に近く、既に得られた知見を利用することができるので、検討対象から除外し、水素利用のメリットが最大限に期待できる固体高分子型燃料電池の性能検討を実施した。

(b)固体高分子型燃料電池の性能検討

固体高分子型燃料電池の用途としては、オンサイト用、自家発電用及び自

動車用の3つが存在する。これらの水素を直接燃料として利用した際の用途及び燃料電池の基本仕様を表3.5.2-5に示す。

(イ) オンサイト用

200kW級の場合、AC送電端効率は、43.2%となった。排熱の利用法として、吸収式及び吸着冷凍式冷凍機による冷熱変換を検討したが、排熱温度が低く、設備構成が複雑化する等のデメリットが生じるため、暖房、給湯用のみに適していることが判明した。

(ロ) 自家発電用

5000kW級の場合、AC送電端効率は、56.4%となった。高圧(8ata)で水素／酸素を供給することにより、高効率の発電ができることが判明した。

(ハ) 自動車用

②輸送機関における検討対象の水素自動車(ミニバス)への燃料電池の適用検討として実施した。

固体高分子型燃料電池は、省サイズ化が見込め、短時間で起動でき、また、起動・停止の繰り返しの強い、という特性を有する。したがって、他方式の燃料電池と比較しても、自動車用として特に優れている。

20kW級の場合、60km/h走行時の発電効率は、29.9%となった。ここで、発電効率が低いのは、出力密度を上げるため、低効率となる高電流密度域で運転することとしたためである。燃料電池の重量出力密度は、100W/kgであり、ディーゼルエンジンの約1/3になることから、さらなる電池特性の向上及び軽量・コンパクト化が必要であることが判明した。

今後は、固体高分子型燃料電池を各種の分野に適用した場合における概念設計を実施する。また、自家用については、④冷熱利用、自動車用については②輸送機関との関係を絡めて検討を実施していく予定である。

表3.5.2-5 固体高分子型燃料電池システムの検討結果

用途対象	酸素	定 格 出 力	電池作動圧力	電池作動温度	電 流 密 度	単 位 電 圧	単 位 電 極 面 積	セル数/スタック	スタック数	DC発電端出力	イリタータ効率	AC発電端出力	補 機 動 力	水 素 供 給 量	酸化剤供給量	発電効率(HHV)	" (LHV)	排熱回収率	その他の
小規模工場、病院、ホテル等	空気	200kW	1 ata	90℃	0.30A/cm ²	0.706V	1,208cm ²	214	4	219kW	95%	208kW	8kW	131Nm ³ /h	619Nm ³ /h	43.2%	51.1%	36.6% (LHV 80℃)	H ₂ 利用率99%, 空気利用率50%
産業用、電気事業用	酸素	5,000kW	8 ata	80℃	0.30A/cm ²	0.896V	5,000cm ²	660	6	5,322kW	97%	5,162kW	149kW	2,520Nm ³ /h	1,273Nm ³ /h	56.4%	66.6%	—	H ₂ , O ₂ 供給圧力10ata, H ₂ 利用率99%, O ₂ 利用率98%
26人乗りハイブリッドバス	空気	20kW	3 ata	80℃	1.10A/cm ²	0.59V	900cm ²	46	1	26.4kW	—	—	6.4kW	18.9Nm ³ /h	89.5Nm ³ /h	29.9%	35.3%	—	H ₂ 利用率99%, 空気利用率50%
自動車用	自家発電用																		

④ 冷熱利用

主要な冷熱の利用形態として期待できる冷熱発電及び空気液化分離（酸素製造）について検討を行った。空気液化分離（酸素製造）については、①動力発生、③酸水素利用燃料電池で検討している技術において必要とされる酸素供給条件を考慮しつつ、検討することとした。

(a) 冷熱発電

LNG冷熱発電をベースに検討を実施した。（表3-5-2.6）

LNG冷熱発電サイクルは大別して、ランキンサイクルとブレイトンサイクルに分けられ、このうち、実際に実用、実証プラントとして稼働しているのはランキンサイクルのみである。ブレイトンサイクルによるLNG冷熱発電は、LNGの燃焼ガスによるガスタービンサイクルの圧縮機入口温度をLNG冷熱により低下させ、圧縮機動力を低減させるものであり、研究開発段階にある。

液体水素にこれらのサイクルを適用した場合、冷熱エクセルギーの有効利用及びプラント実現性の点から水素直接膨張サイクルと二次媒体のランキンサイクルの組み合わせ方式が適しているとの結論を得た。また、この方式を実現するためには、液体水素の極低温に対応した液体水素ポンプ、タービン、熱交換器等の開発が併せて必要であることが明らかになった。

(b) 空気液化分離（酸素製造）

上述の①動力発生及び③酸水素利用燃料電池において検討を行った表3-5-2.7の技術について、必要な酸素供給条件を設定し、酸素製造方法として考えられる深冷分離法¹⁾、PSA(Pressure Swing Adsorption)併用一段凝縮法²⁾、及び低温VSA(Vacuum Swing Adsorption)・V-PSA(Vacuum Pressure Swing Adsorption)法³⁾の3方式について検討した。

その結果、大容量の酸素製造では従来型の深冷分離法が優位性を有するものの小容量の酸素製造では、液体水素の冷熱エネルギーを有効に利用できるPSA併用一段凝縮法、低温VSA・V-PSA法が有望であることが判明した。

1) 深冷分離法：多成分系混合ガスである原料ガス（空気）を圧縮、冷却、

膨張等の操作によって液化させ、精留又は凝縮によって

それぞれの成分ガス(窒素、酸素)に分離する方法

2) P S A 併用一段凝縮法：吸着媒(モレキュラーシーブ)により原料ガ

ス中の目的ガス濃度を上げたガスを原料として深冷分離

を行う方法

3) 低温VSA・V-PSA法：原料ガスを冷却し、低温により吸着能力を増大さ

せた吸着媒により原料ガス中の目的ガスを分離する方法

表3-5-2.7 各種水素利用技術の酸素供給条件

動力発生 of 名称	出力 kW	必要酸素量 Nm ³ /h	圧力 kg/cm ²	酸素純度 %
単原子作動ガス循環 型水素ディーゼル	600	213.8	0.3	97
水蒸気循環型水素 ディーゼル	1,000	531.6	5.0	95
固体高分子型酸水素 利用燃料電池	5,000	1,651.0	9.0	96

今後は、冷熱利用の方式のうち、小容量の酸素製造に有望とされたPSA併用一段凝縮法、低温VSA・V-PSA法について、プラントコスト等の経済性も考慮しつつ、技術課題の詳細検討を実施する予定である。

(2) 水素利用の効果と水素受入・供給方法の検討

人口30万人規模のモデル都市へのエネルギー供給を理論上の限界まで水素エネルギーで賄った場合の水素供給システムを想定し、多数の分散型の需要に対して水素を供給する場合の問題点、技術課題を検討した。

本検討は、現実の世界では実現困難なシナリオであるが、逆に水素への置き換えのボトルネックとして何が問題点かを洗い出すための作業と位置づけられる。すなわち、個々の水素利用技術を構築したシステムに適用した場合に発生する技術的課題を抽出するための予備検討として実施した。

① 水素利用の効果

水素利用の効果を検討するため、人口30万人規模地方都市（豊橋市）のエネルギー需要をいくつかの前提条件を置き、エネルギー供給を理論上の限界まで水素エネルギーで賄った場合の水素供給量を算出した。（表3-5-2.8,10）豊橋市を選んだ理由は、①エネルギー需給に関する統計結果が完備されていること、②平均的な中規模地方都市であること、の2点である。

本検討の算定より、モデル都市の全エネルギー需要の80%に当たる166,000(t/年)の水素の供給が見込まれる。水素を極力導入することによって、機器の効率向上効果により、全エネルギー需要が約10.2%削減され、CO₂の排出量が80%以上削減されることが判明した。（表3-5-2.11参照）

今後は、経済性等を踏まえた現実的なアプローチにより水素を部分的に都市に導入した場合における、各利用形態毎の最適な水素導入割合について検討を行う必要がある。

② 水素受入方法の検討

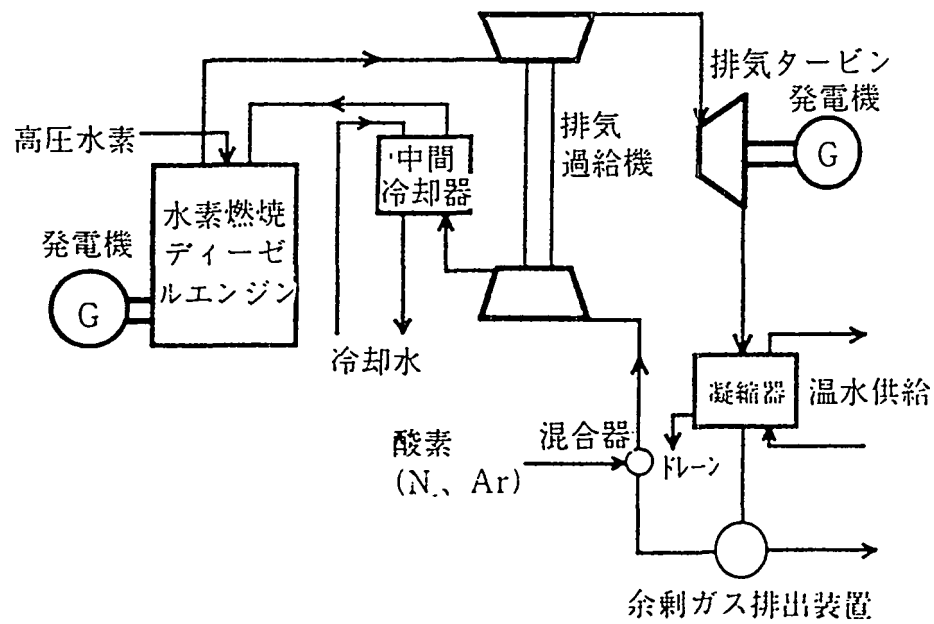
液体水素を専用船から陸上の貯蔵タンクへ荷揚げした場合、多量のフラッシュガスが発生する。このため、液体水素専用船に係留した場合の受入基地設備について検討を行った。受入基地設備の概要は、表3-5-2.12の通りである。検討の結果、水素の分散利用を図る上では、特に水素ガスの損失が少ないコンテナ積込設備、ボンベ充填設備の開発の必要性が明らかになった。

③ 需要先への水素供給方法

供給方法として、コンテナ、加圧ポンベを使用した場合について検討したところ、一日当たり約103のコンテナ運搬基及び約600本のポンベの輸送が必要となることが明らかとなった。また、液体水素を供給する場合、各需要先において、水素貯蔵設備が必要となるため、輸送用コンテナを貯蔵用タンクとして使用する場合についても検討した。その結果、各需要先に1基ずつコンテナが必要となるため、多量のコンテナが必要となることが明らかとなった。（表3-5-2.13,14参照）

今後は、上記で検討した供給システムについて、経済性等を勘案した場合に予想される各水素利用技術（水素コージェネレーションシステム、酸水素利用燃料電池等）の導入割合を推定するとともに、個々の利用技術の技術課題、供給系で生じる技術課題について、詳細検討を実施する予定である。

(単原子作動ガス循環型)



(水蒸気循環型)

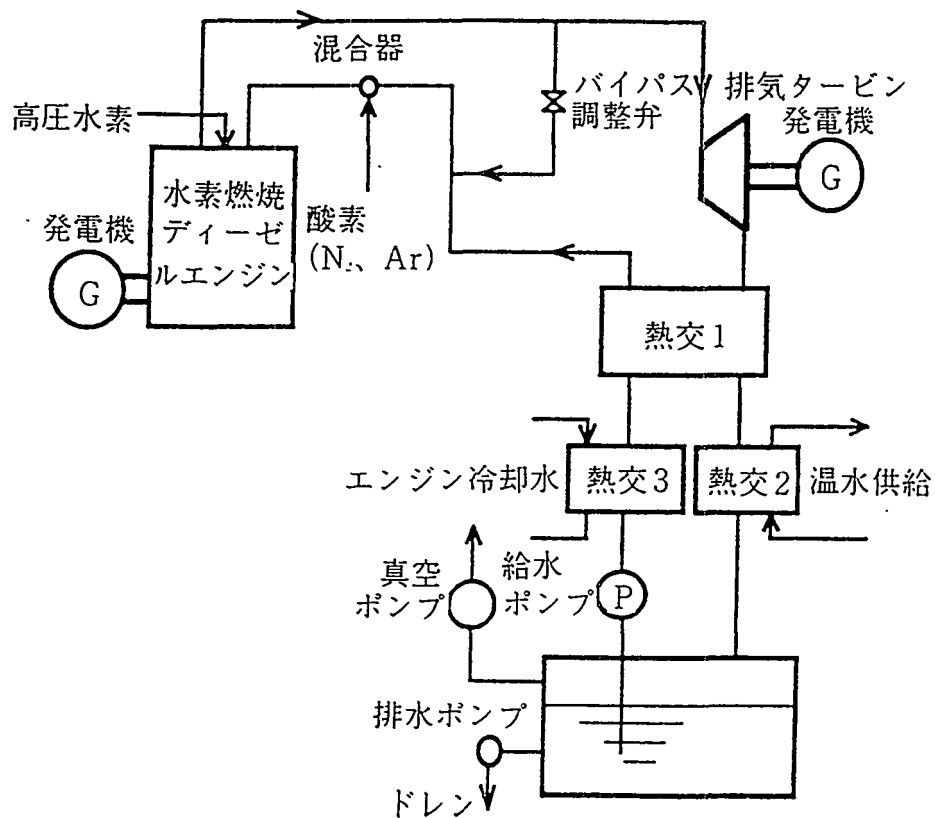


図3.5.2-1 クローズド循環型水素／酸素燃焼ディーゼルエンジンエネルギーシステム

表 3.5.2-4 各種燃料電池の比較

アルカリ型燃料電池		固体高分子型燃料電池		りん酸型燃料電池		溶融炭酸塩型燃料電池		固体電解質型燃料電池			
開発段階	宇宙用電源として実用化	基礎開発段階		実用化開発段階 (後期)		実用化開発段階 (前期)		基礎研究段階			
開発状況	Siemens が潜水艦用 100kW、Elenco がバス用 75kW 実証試験。国内では 10kW を試験		Ballard が 10kW、Siemens が 20kW セル開発。国内では 1-5kW 級の開発が主体		オンサイト用で 50-1,000kW、電力事業用で 1-11MW 実証試験		外部改質型は 100kW 級を開発、現在 1,000kW プラント開発中。内部改質型は 30kW を開発		VESTINGHOUSE 社の 25kW 実証機が最大 (国内で試験)。国内では 1kW 級の開発が主体		
現状技術	単セル面積	数百 - 千 cm ²		数百 - 千 cm ²		1 m ² (11MW 実証プラント)		1.2 m ² (外部改質型)		数百 cm ² クラス	
	用途	潜水艦用プロトタイプ		車船用		オンサイト用		電力事業用		電力事業用	
	発電規模	10kW		40-80kW		200kW		1,000kW 目標値		300kW 設計例	
	燃料/酸化剤	H ₂ /O ₂ (8E)		H ₂ /O ₂		H ₂ /O ₂		H ₂ /O ₂ (5ata)		H ₂ /O ₂ (10ata)	
性能	効率/発電効率 (HHV) (G _{セル})	54% (DC/AC 効率)		45%		53%		41.3%		(MCFC) 48.7% (G/T) 6.3%	
	熱回収率 (G _{セル})	54%		45%		53%		36.6%		(SOFC) 48.4% (G/T) 10.6% (S/T) 2.0%	
	熱回収率 (G _{セル})	54%		45%		53%		44.7%		—	
	熱回収率 (G _{セル})	54%		45%		53%		81.3%		—	
特徴	単セル特性	100mA/cm ² -0.82V		1A/cm ² -0.6V		235mA/cm ² -0.66V		150mA/cm ² -0.8V		200mA/cm ² -0.8V	
	燃料/酸化剤	CO、CO ₂ は被毒原因になる		CO は被毒原因になる		CO の含有率に制限がある (1%)		燃料として CO も利用される		燃料として CO も利用される	
	起動/停止時間	数分 (定格まで)		数分 (定格まで)		数時間		—		—	
	劣化率	数~数十 mV/1000hrs		数 mV/1000hrs		数 mV/1000hrs		数 mV/1000hrs		—	
水素利用における予測性能	その他	触媒を含め、材料が安価		他の燃料電池に比べ、高出力密度		信頼性に課題があるが実用化に近い		単機容量が大きく、大規模化が容易		内部改質により、システムが簡略	
	想定される用途	車船用、小型オンサイト用		車船用、非常用、分散電源用等		車船用、オンサイト用、分散電源用		電力事業用、オンサイト用		電力事業用、オンサイト用	
	想定される発電規模	50kW - 500kW		数 kW - 数千 kW		50kW - 10MW		500kW - 数 MW		500kW - 数 MW	
	想定条件	100kW、常圧		100kW、常圧		100kW、常圧		300-500kW、7ata (S/T or G/T 仕様)		(S/T 仕様)	
水素利用における予測性能	発電効率 (G _{セル})	H ₂ /O ₂ 49%		H ₂ /O ₂ 60-65%		H ₂ /O ₂ 54%		H ₂ /O ₂ ≥55%		H ₂ /O ₂ 55-60%	
	熱回収率 (G _{セル})	44%		—		40%		—		—	
	熱回収率 (G _{セル})	44%		—		40%		—		—	
	熱回収率 (G _{セル})	44%		—		40%		—		—	
水素利用における予測性能	熱回収率 (G _{セル})	44%		—		40%		—		—	
	熱回収率 (G _{セル})	44%		—		40%		—		—	
	熱回収率 (G _{セル})	44%		—		40%		—		—	
	熱回収率 (G _{セル})	44%		—		40%		—		—	
水素利用における予測性能	熱回収率 (G _{セル})	44%		—		40%		—		—	
	熱回収率 (G _{セル})	44%		—		40%		—		—	
	熱回収率 (G _{セル})	44%		—		40%		—		—	
	熱回収率 (G _{セル})	44%		—		40%		—		—	
水素利用における予測性能	熱回収率 (G _{セル})	44%		—		40%		—		—	
	熱回収率 (G _{セル})	44%		—		40%		—		—	
	熱回収率 (G _{セル})	44%		—		40%		—		—	
	熱回収率 (G _{セル})	44%		—		40%		—		—	
水素利用における予測性能	熱回収率 (G _{セル})	44%		—		40%		—		—	
	熱回収率 (G _{セル})	44%		—		40%		—		—	
	熱回収率 (G _{セル})	44%		—		40%		—		—	
	熱回収率 (G _{セル})	44%		—		40%		—		—	
水素利用における予測性能	熱回収率 (G _{セル})	44%		—		40%		—		—	
	熱回収率 (G _{セル})	44%		—		40%		—		—	
	熱回収率 (G _{セル})	44%		—		40%		—		—	
	熱回収率 (G _{セル})	44%		—		40%		—		—	
水素利用における予測性能	熱回収率 (G _{セル})	44%		—		40%		—		—	
	熱回収率 (G _{セル})	44%		—		40%		—		—	
	熱回収率 (G _{セル})	44%		—		40%		—		—	
	熱回収率 (G _{セル})	44%		—		40%		—		—	
水素利用における予測性能	熱回収率 (G _{セル})	44%		—		40%		—		—	
	熱回収率 (G _{セル})	44%		—		40%		—		—	
	熱回収率 (G _{セル})	44%		—		40%		—		—	
	熱回収率 (G _{セル})	44%		—		40%		—		—	
水素利用における予測性能	熱回収率 (G _{セル})	44%		—		40%		—		—	
	熱回収率 (G _{セル})	44%		—		40%		—		—	
	熱回収率 (G _{セル})	44%		—		40%		—		—	
	熱回収率 (G _{セル})	44%		—		40%		—		—	
水素利用における予測性能	熱回収率 (G _{セル})	44%		—		40%		—		—	
	熱回収率 (G _{セル})	44%		—		40%		—		—	
	熱回収率 (G _{セル})	44%		—		40%		—		—	
	熱回収率 (G _{セル})	44%		—		40%		—		—	
水素利用における予測性能	熱回収率 (G _{セル})	44%		—		40%		—		—	
	熱回収率 (G _{セル})	44%		—		40%		—		—	
	熱回収率 (G _{セル})	44%		—		40%		—		—	
	熱回収率 (G _{セル})	44%		—		40%		—		—	
水素利用における予測性能	熱回収率 (G _{セル})	44%		—		40%		—		—	
	熱回収率 (G _{セル})	44%		—		40%		—		—	
	熱回収率 (G _{セル})	44%		—		40%		—		—	
	熱回収率 (G _{セル})	44%		—		40%		—		—	
水素利用における予測性能	熱回収率 (G _{セル})	44%		—		40%		—		—	
	熱回収率 (G _{セル})	44%		—		40%		—		—	
	熱回収率 (G _{セル})	44%		—		40%		—		—	
	熱回収率 (G _{セル})	44%		—		40%		—		—	
水素利用における予測性能	熱回収率 (G _{セル})	44%		—		40%		—		—	
	熱回収率 (G _{セル})	44%		—		40%		—		—	
	熱回収率 (G _{セル})	44%		—		40%		—		—	
	熱回収率 (G _{セル})	44%		—		40%		—		—	
水素利用における予測性能	熱回収率 (G _{セル})	44%		—		40%		—		—	
	熱回収率 (G _{セル})	44%		—		40%		—		—	
	熱回収率 (G _{セル})	44%		—		40%		—		—	
	熱回収率 (G _{セル})	44%		—		40%		—		—	
水素利用における予測性能	熱回収率 (G _{セル})	44%		—		40%		—		—	
	熱回収率 (G _{セル})	44%		—		40%		—		—	
	熱回収率 (G _{セル})	44%		—		40%		—		—	
	熱回収率 (G _{セル})	44%		—		40%		—		—	
水素利用における予測性能	熱回収率 (G _{セル})	44%		—		40%		—		—	
	熱回収率 (G _{セル})	44%		—		40%		—		—	
	熱回収率 (G _{セル})	44%		—		40%		—		—	
	熱回収率 (G _{セル})	44%		—		40%		—		—	
水素利用における予測性能	熱回収率 (G _{セル})	44%		—		40%		—		—	
	熱回収率 (G _{セル})	44%		—		40%		—		—	
	熱回収率 (G _{セル})	44%		—		40%		—		—	
	熱回収率 (G _{セル})	44%		—		40%		—		—	
水素利用における予測性能	熱回収率 (G _{セル})	44%		—		40%		—		—	
	熱回収率 (G _{セル})	44%		—		40%		—		—	
	熱回収率 (G _{セル})	44%		—		40%		—		—	
	熱回収率 (G _{セル})	44%		—		40%		—		—	
水素利用における予測性能	熱回収率 (G _{セル})	44%		—		40%		—		—	
	熱回収率 (G _{セル})	44%		—		40%		—		—	
	熱回収率 (G _{セル})	44%		—		40%		—		—	
	熱回収率 (G _{セル})	44%		—		40%		—		—	
水素利用における予測性能	熱回収率 (G _{セル})	44%		—		40%		—		—	
	熱回収率 (G _{セル})	44%		—		40%		—		—	
	熱回収率 (G _{セル})	44%		—		40%		—		—	
	熱回収率 (G _{セル})	44%		—		40%		—		—	
水素利用における予測性能	熱回収率 (G _{セル})	44%		—		40%		—		—	
	熱回収率 (G _{セル})	44%		—		40%		—		—	
	熱回収率 (G _{セル})	44%		—		40%		—		—	
	熱回収率 (G _{セル})	44%		—		40%		—		—	
水素利用における予測性能	熱回収率 (G _{セル})	44%		—		40%		—		—	
	熱回収率 (G _{セル})	44%		—		40%		—		—	
	熱回収率 (G _{セル})	44%		—		40%		—		—	
	熱回収率 (G _{セル})	44%		—		40%		—		—	
水素利用における予測性能	熱回収率 (G _{セル})	44%		—		40%		—		—	
	熱回収率 (G _{セル})	44%		—		40%		—		—	
	熱回収率 (G _{セル})	44%		—		40%		—		—	
	熱回収率 (G _{セル})	44%		—		40%		—		—	
水素利用における予測性能	熱回収率 (G _{セル})	44%		—		40%		—		—	
	熱回収率 (G _{セル})	44%		—		40%		—		—	
	熱回収率 (G _{セル})	44%		—		40%		—		—	
	熱回収率 (G _{セル})	44%		—		40%		—		—	
水素利用における予測性能	熱回収率 (G _{セル})	44%		—		40%		—		—	
	熱回収率 (G _{セル})	44%		—		40%		—		—	
	熱回収率 (G _{セル})	44%		—		40%		—		—	
	熱回収率 (G _{セル})	44%		—		40%		—		—	
水素利用における予測性能	熱回収率 (G _{セル})	44%		—		40%		—		—	
	熱回収率 (G _{セル})	44%		—		40%		—		—	
	熱回収率 (G _{セル})	44%		—		40%		—		—	
	熱回収率 (G _{セル})	44%		—		40%		—		—	
水素利用における予測性能	熱回収率 (G _{セル})	44%		—		40%		—		—	
	熱回収率 (G _{セル})	44%		—		40%		—		—	
	熱回収率 (G _{セル})	44%		—		40%		—		—	
	熱回収率 (G _{セル})	44%		—		40%		—		—	
水素利用における予測性能	熱回収率 (G _{セル})	44%		—		40%		—		—	
	熱回収率 (G _{セル})	44%		—		40%		—		—	
	熱回収率 (G _{セル})	44%		—		40%		—		—	
	熱回収率 (G _{セル})	44%		—		40%		—		—	
水素利用における予測性能	熱回収率 (G _{セル})	44%		—		40%		—		—	
	熱回収率 (G _{セル})	44%		—		40%		—		—	
	熱回収率 (G _{セル})	44%		—		40%		—		—	
	熱回収率 (G _{セル})	44%		—		40%		—		—	
水素利用における予測性能	熱回収率 (G _{セル})	44%		—		40%		—		—	
	熱回収率 (G _{セル})	44%		—		40%		—		—	
	熱回収率 (G _{セル})	44%		—		40%		—		—	
	熱回収率 (G _{セル})	44%		—		40%		—		—	
水素利用における予測性能	熱回収率 (G _{セル})	44%		—		40%		—		—	
	熱回収率 (G _{セル})	44%		—		40%		—		—	
	熱回収率 (G _{セル})	44%		—		40%		—		—	
	熱回収率 (G _{セル})	44%		—		40%		—		—	
水素利用における予測性能	熱回収率 (G _{セル})	44%		—		40%		—		—	
	熱回収率 (G _{セル})	44%		—		40%		—		—	
	熱回収率 (G _{セル})	44%		—		40%		—		—	
	熱回収率 (G _{セル})	44%		—		40%		—		—	
水素利用における予測性能	熱回収率 (G _{セル})	44%		—		40%		—		—	
	熱回収率 (G _{セル})	44%		—		40%		—		—	
	熱回収率 (G _{セル})	44%		—		40%		—		—	
	熱回収率 (G _{セル})	44%		—		40%		—		—	
水素利用における予測性能	熱回収率 (G _{セル})	44%		—		40%		—		—	
	熱回収率 (G _{セル})	44%		—		40%		—		—	
	熱回収率 (G _{セル})	44%		—		40%		—		—	
	熱回収率 (G _{セル})	44%		—		40%		—		—	
水素利用における予測性能	熱回収率 (G _{セル})	44%		—		40%		—		—	
	熱回収率 (G _{セル})	44%		—		40%		—		—	
	熱回収率 (G _{セル})	44%		—		40%		—		—	
	熱回収率 (G _{セル})	44%		—		40%		—		—	
水素利用における予測性能	熱回収率 (G _{セル})	44%		—		40%		—			

表 3.5.2-6 L N G 冷 熱 発 電 の 方 式

発電方式	概 略 系 統	特 徴	実用状況
ラ ン キ ン サ イ ク ル	基本形式 P:ポンプ ORV:蒸発器 T:タービン G:発電機 BV:バリュブ AH:加熱器	加圧したLNGを蒸発させ、タービン内にて膨張させて電力を回収。 系統的に最も簡単であるが、タービン排気の湿り度が多くなる関係上入口圧力を高くすることができず、回収電力量は他方式に比べ少ない。	あり
	再熱式 RH:再熱器	基本形式の欠点をカバーするために、再熱することにより各タービン排気の湿り度を抑えると同時に、タービン全体としての断熱熱落差の増大を図ったもの。 最適再熱圧力が存在する。	あり
	再熱再生式 HT:再生器 DP:フロンポンプ	再熱式に更に再生器を組み込んで、LNGの冷熱を有効利用してNGの再生を行い、HPタービン通過NG量を増加させ回収電力量の増加を図ったもの。 2段再生方式も可能である。系統的には複雑となる。	なし
二 次 媒 体 方 式	C:凝縮器	LNGの冷熱のみを有効利用するもので、媒体としては単一組成物質（プロパン、フロン等）あるいは混合物質がある。媒体サイクルに再熱、再生方式を導入することも可能。ただしNG以外の媒体を使用する点が問題。	あり
二 組直次 合接媒 せ膨体 方張+ 式		LNGの冷熱利用とNGの膨張エネルギー回収との両方を目的としたサイクル。 両者の兼ね合いからサイクルの出力が最大となる最適条件（NGタービン入口圧力）が存在する。	あり
ブ レ イ サ ト イ ン ク ル	(オープンサイクル) CP:圧縮機 B:燃焼器	NG又は他の燃料を燃焼させるガスタービンサイクルにおいて、圧縮機入口温度をLNG冷熱より下げることにより、高効率化することを目的としたサイクル。 この他、クローズドサイクルもあるが、いずれも技術課題や高価な建設費用などのため実現していない。	なし

表 3.5.2-8 水素エネルギーへの変換方法

需 要 種 別	水素エネルギーへの転換方法
電 力 (発電用燃料)	全電力需要を水素を燃料とする地域内発電に転換
運輸部門 (自動車燃料)	運輸用燃料需要の全量を水素へ転換
一般燃料の石油類、L P G	全需要の 50 % を水素へ転換
家庭用 L P G	水素へ転換せず (これまでどうり L P G を供給)
都市ガス	供給熱量の 10 % を水素へ転換

表 3.5.2-9 発電設備の構成と水素必要量

発 電 設 備	公称 能力	発電量 GWh	発電効率 % (HHV)	水素必要量		排熱利用量		必要基数
				TJ	ton	TJ	利用率%	
水素燃焼ガスタービン	50MW	877	54.5	5,793	40,857			4
水素ディーゼル	1MW	263	42.0	2,254	15,899	710	31.5	38
	600kW	158	37.5	1,517	10,698	364	24.0	55
燃料電池	5MW	316	56.0	2,031	14,327			12
	200kW	140	42.0	1,200	8,463	315	26.3	140
合 計		1,754	Av 49.4	12,795	90,244	1,389	Av.10.9	

(注) 各発電設備の設備利用率が 57 % となるように必要基数を設定した。ただし、水素燃焼ガスタービンについては、4 基、設備利用率 50 % とした。

表 3.5.2-10 豊橋市のエネルギー需要構造と水素エネルギーへの転換可能量試算

種 別	需 要 量 (固有単位)	需 要 部 門 別 内 訳					1次エネルギー 換算需要量	発電排熱 の利用量	水素への転換量		既存エネルギー の供給量	水素への 転換率
		運輸用	低温熱	高温熱	家庭用	発電用			熱量ベース	重量ベース		
電 力	1,754×GWh					12,795 TJ	12,795 TJ		12,795 TJ	90,243 t		100.0 %
ガソリン	111.0×10 ³ kl	3,903 TJ					3,903 TJ		3,903 TJ	27,527 t		100.0 %
灯 油	65.7×10 ³ kl		2,111 TJ	337 TJ			2,448 TJ	574 TJ	937 TJ	6,607 t	937 TJ	38.3 %
軽 油	60.6×10 ³ kl	2,334 TJ					2,334 TJ		2,334 TJ	16,460 t		100.0 %
重 油	167.2×10 ³ kl	707 TJ	1,559 TJ	4,453 TJ			6,719 TJ	710 TJ	3,358 TJ	23,684 t	2,651 TJ	50.0 %
L P G	5,920 t	41 TJ	142 TJ	22 TJ	92 TJ		297 TJ		123 TJ	867 t	174 TJ	41.4 %
都市ガス	42.9×10 ⁶ m ³		182 TJ	182 TJ	534 TJ		898 TJ	105 TJ	79 TJ	559 t	714 TJ	8.8 %
合 計		6,985 TJ	3,994 TJ	4,994 TJ	626 TJ	12,795 TJ	29,394 TJ	1,389 TJ	23,529 TJ	165,947 t	4,476 TJ	80.0 %
発電排熱の利用量			963 TJ	426 TJ			1,389 TJ					
水素への転換量	熱量	6,985 TJ	1,485 TJ	2,211 TJ	53 TJ	12,795 TJ	23,529 TJ					
	重量	49,261 t	10,473 t	15,593 t	377 t	90,243 t	165,947 t					
既存エネルギーでの供給量			1,546 TJ	2,357 TJ	573 TJ		4,476 TJ					
水素への転換率		100.0 %	37.2 %	44.3 %	8.5 %	100.0 %	80.0 %					

表 3.5.2-11 モデル都市のエネルギー必要量と二酸化炭素削減率

	従来方式での エネルギー供給	水素エネルギーシステム	
		発電排熱利用せず	発電排熱利用する
エネルギー必要量	33,120 TJ	29,390 TJ	28,000 TJ
削減量	(発電効率向上)	3,730 TJ	3,730 TJ
	(発電排熱利用)		1,390 TJ
削減率		11.3%	15.5%
水素エネルギー供給量		24,180 TJ	23,530 TJ
従来エネルギー供給量	33,120 TJ	5,210 TJ	4,480 TJ
二酸化炭素排出量	517.0×10 ³ ton	94.6×10 ³ ton	81.2×10 ³ ton
削減率		81.7%	84.3%

表 3.5.2-12 受入基地設備

主 要 設 備	概 略 規 模	備 考
液体水素荷揚設備	170t-積載量: 14,200 ton (専用岸壁、700t-170t配管など) ※147量: 0.2%/日	タンカーを常時係留できる専用岸壁が必要。 ボイルオフガスは「メ-」燃料とする。
コンテナ積出設備	340 t/日	水素ガスの損失がなく、かつボイルオフを極小とする設備・取扱方法の開発が水素分散利用のポイント。
ボイルオフ元填設備	1.6 t/日	
メ-1477メ-圧縮機	78 t/日	メ-1477圧縮機入口圧力までの圧縮。圧縮用動力が問題。
液体水素蒸発器	34 t/日	利用できる冷熱量は極めて少ない。
水素燃焼メ-1477-発電設備	112 t/日	ボイルオフガスを消費するために荷揚・受入基地との関係立地が必要である。
酸素製造設備 (空気分離装置)	900 t-0.7/日	
都市ガスへの混入	1.5 t/日	ボイルオフガスの一部を利用。受入基地に隣接して設備。

(注) 液体水素の荷揚・受入方式には次の3方式が考えられるが、上表には専用船係留方式のみを記す。

(1) 液体水素専用船係留方式 (貯蔵タンクを設けず、専用船を貯蔵タンク代わりに利用する。)

(2) 専用船係留+貯蔵タンク方式

(3) 貯蔵タンク方式 (液体水素を短時間で貯蔵タンクへ揚荷し、専用船は運航にのみ使用する。)

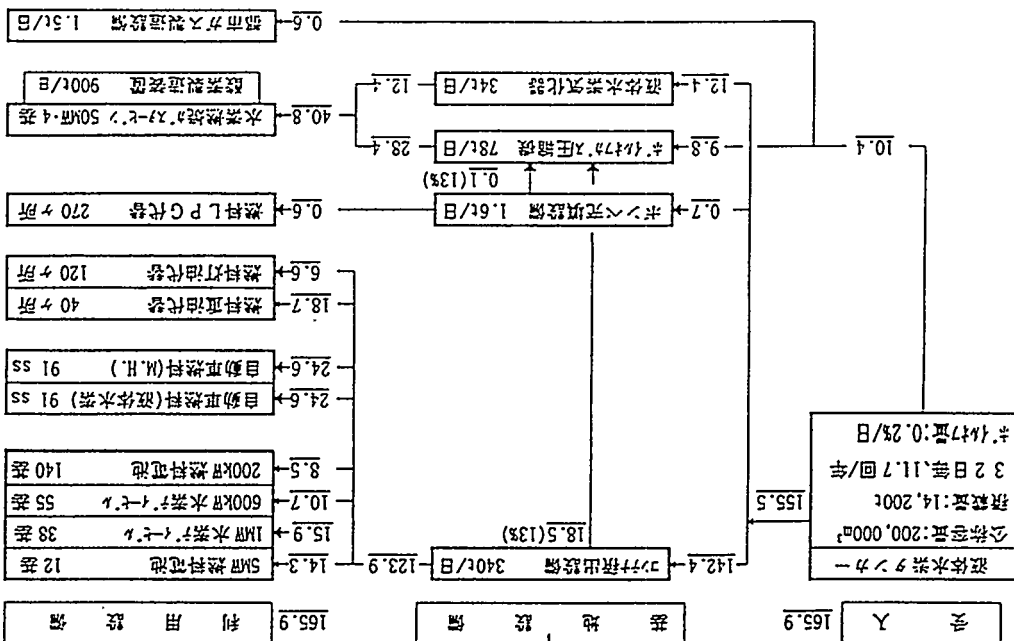
表 3.5.2-13 需要先への水素供給方法

需 要 種 別	全供給量	需要先 141t/日	消費量 141t/日	供給方法	必要最大 供給能力	必要 消費量
5MWh 燃料電池	39.3 t/日	12	3.27 t/日	コンテナ	5.44 t/日	2.1 基/日
1MW 水素「メ-」	43.6	38	1.15	コンテナ	1.99	1.3 基/基
600kW 水素「メ-」	29.3	55	0.53	コンテナ	0.93	2.8
200kW 燃料電池	23.2	140	0.17	コンテナ	0.29	9.1
自動車燃料 (液体水素)	67.5	91	0.74	コンテナ	0.83	3.2
自動車燃料 (M.H. 車載)	67.5	91	0.74	コンテナ	0.83	3.2
燃料重油代替	51.2	40	1.28	コンテナ	1.55	1.7
燃料灯油代替	18.1	120	0.15	コンテナ	0.31	8.5
LPG代替 (工業用)	1.18	40	29 kg/日	加圧ボイル	37 kg/日	10.7 本/日
LPG代替 (業務用)	0.42	230	1.8	加圧ボイル	2.6	0.9

(注) 1. 燃料重・灯油およびLPG代替の需要先サイト数は、上記1サイト当りの消費量で全供給量を除した数値。
2. 発電設備では10%負荷での運転時の消費量を、その他の需要では最大消費量の1日当り消費量を必要最大供給能力の基準数値とした。3. コンテナ (ISO 40型): 公称容量 1,100⁴、積載量 2.63 ton
4. 加圧ボイル: 140⁴、250 bar、元填量 2.8 kg
5. コンテナの運送: 1.8⁴所/日とする。

6. コンテナを需要先に留め置き、サービス貯槽として使用する場合には、上記必要台数に加え、各サイト毎に1基のコンテナが必要となる。

表 3.5.2-14 水素供給システムの概要



(注) (1) 下段した数値は、年間処理量 [千 ton/年]

(2) コンテナへの所送時およびボイルへの元填時に発生するガス水素 (液体水素量の1.3%) は、全量回収し、

3. 6 革新的・先導的技術

本プロジェクトは、西暦2020年までの長期間に亘るプロジェクトであり、その有効性を保つためには、将来の技術動向の予測を行い、全体システムの構成技術を常に最適化していく必要がある。このため、他のサブタスクにおける当面の開発対象ではない革新的・先導的技術について調査及び基礎研究を行い、有望な技術を抽出することにより、本プロジェクトに反映することとしている。

具体的には、委託先である（財）エネルギー総合工学研究所に有識者から構成される委員会を設置し、各種の革新的・先導的技術を評価し、有望な技術を抽出している。

(1) 革新的・先導的技術の評価

革新的・先導的技術の候補として、平成8年度までに23件の提案が得られた。本研究では、これらの提案を評価するため、階層化意志決定法（AHP）を採用することとし、評価項目・重み作成・評価基準などの検討を行い、適切な評価を行うための手法を得た。更に、この評価手法を用いて、各種の革新的・先導的技術の評価を実施した。

① 手法の検討

委員会において、評価手法として階層化意志決定法（AHP）を採用することにつき、検討を行い、具体的な評価の手順を決めた。

評価手法：階層化意志決定法（Analytic Hierarchy Process：AHP）

評価項目：【技術的意義】

ポテンシャル、性能、新規性

【研究開発・政策上の意義】

コストパフォーマンス、WE-NETとの整合性、国際性（R&D）

【社会的意義】

環境負荷、社会の受容性、社会的な波及効果

技術分類：

表3.6-1 評価技術の分類

	小規模	大規模
短期	I 型	II 型
長期	III 型	IV 型

期間：西暦2005年から2010年程度

を境界とする。

規模：1,000kW程度を境界とし、提案技術の
ユニットの大きさを分類する。

1,000kW=1360ps

1,000kWh=3600MJ=860Mcal

=93L（原油）*1

*1) 水素を燃料として利用する場合を考慮し、原油換算は発熱量のみで試算した。

<新規技術の調査手法の確立（提案技術の処理フロー作成）>

提案技術を評価するには「階層化意志決定法（AHP）」を使った採点評価と委員会における調整評価の２段階の手順を経て評価を確定する手段をとる。

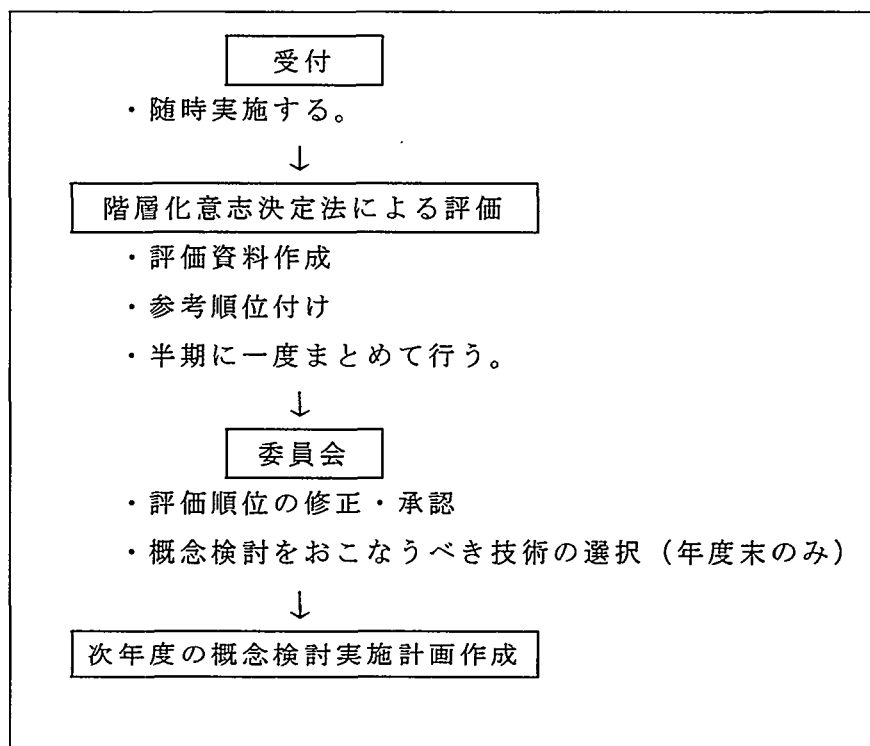


図3.6-1 検討手順

②革新的・先導的技術の提案及び評価

平成5～7年度において、委員会の委員等から各種の革新的・先導的技術の提案を受け、①の階層化意志決定法による評価を実施するとともに、委員会で更なる調整評価を実施したところ、表3.6-3に示す提案技術が高く評価された。

表3.6-2 提案状況

年度	提案件数	累積件数
平成5年度	10	10
平成6年度	10	20
平成7年度	3	23

表3.6-3 評価結果（抜粋）

順位	提案技術	提案者	分類	得点
1	水素-炭素内蔵型スターリング機関の解析・評価	機械技術研究所	Ⅲ	7.356
2	Hydrogen Production by Solid Oxide Electrolysis	Westinghouse Electric Corporation	Ⅳ	7.155
3	Development of Magnetic Refrigeration Technology for Liquefaction of Hydrogen	ケベック大学	Ⅲ	7.119
4	Solar Thermal Hydrogen Production with Iron Storage Technology	Daimler-Benz Aerospace	Ⅳ	7.017
5	光触媒を用いた水素製造技術 層状化合物による水分解用光触媒の開発	住友金属鉱山 ニコン	Ⅲ	6.852

(2) 革新的・先導的技術の調査

本研究では革新的・先導的技術の基礎研究を実施するに先立ち、各技術のより詳細な状況を把握するために調査を実施している。表3.6-4に概念検討の実施状況を示す。

表3.6-4 概念検討の実施状況

年度	テーマ	依頼先
H 7	太陽熱利用による水素製造の可能性	ダイムラー・ベンツエアロスペース社
	夜間電力利用による水素製造の合理性	東京大学
H 8	水素－酸素内燃型スターリング機関の解析・評価	東京電機大学
	Evaluation of Economical Feasibility of Solar Thermal Technology	ダイムラー・ベンツエアロスペース社
	光変換プロセスのシステム効率の比較	東京大学
	高温水蒸気電解の経済性（暫定テーマ）	ウエスティングハウス社

(参考)

W E - N E T に係る特許出願状況

平成 8 年 9 月 3 0 日現在の特許出願の件数は以下のとおりである。

1. 特許出願件数

	平成 5 年度	平成 6 年度	平成 7 年度	平成 8 年度	累 計
特許出願	0	3	5	4	1 2

2. 特許出願

(平成 6 年度)

整理番号	出願日	出願番号	発明の名称	出願人
0601	H6/12/ 2	特願平6-299994	液体水素の製造方法及び装置	日本酸素(株)
0602	H6/12/ 2	特願平6-300004	液体水素の製造方法及び装置	日本酸素(株)
0603	H7/ 2/ 1	特願平7- 36020	水電解セルおよびその製造方法	(株)ジャ ハ・ソエナジー

(平成 7 年度)

整理番号	出願日*	出願番号*	発明の名称	出願人*
0701	_____	_____	電解槽	_____
0702	_____	_____	3次元繊維複合体の製造方法	_____
0703	_____	_____	タービン冷却翼とその加工方法	_____
0704	_____	_____	水電解セルおよびその製造方法	_____
0705	_____	_____	水電解セル	_____

(平成8年度)

整理番号	出願日*	出願番号*	発明の名称	出願人*
0801	_____	_____	水素酸素燃焼タービンプ ラント	_____
0802	_____	_____	ネオンを用いた水素液化 方法及び装置	_____
0803	_____	_____	固体高分子電解質水電解 用陽極触媒および陽極	_____
0804	_____	_____	水電解セル	_____

*平成7年度以降の特許出願については、未公開のため、発明の名称のみの記載にとどめた。