昭和51年度

サンシャイン計画委託調査研究成果報告書

太陽エネルギー利用システム調査研究

(太 陽 炉)

昭和52年3月

社団法人 日本電機工業会



太陽炉の研究

社団法人 日本電機工業会

•

i.

昭和52年3月 139頁

研究目的

太陽炉の産業への応用(耐火物,シリコン,高温化学反応等)とその経済性の調査 研究を行なった。 太陽炉専門委員会委員名簿

(アイウエオ順)

		E	E	彳	3	所属
主	査	野		哲	男	通産省名古屋工業技術試験所
委	員	太	田	千	里	窯業協会
"		桜	井	武	磨	東北大学科学計測研究所
"		塚	田	憲	Ξ	三菱電機㈱
"		中	西	栄	治	元揖斐川電気工業㈱
"		柳		謙		三菱重工業㈱
"		柳	下	和	夫	三菱電機㈱
"		※ 若	林		滋	耐火物技術協会
"		山	田	栄	_	钳日本電機工業会
"		铁	原	+;	郎	//

(※印は幹事)

 太陽炉専門委員会, 第1小委員会名簿

 \overline{f}

(アイウエオ順)

			E	£	名	Z I	所属
主	査		若	林		滋	耐火物技術協会
委	員		大	中	·	寛	旭硝子㈱
/	/	*	太	田	千	里	窯業協会
1	/		木	村	修	七	東京工業大学工業材料研究所
,	,		塚	田	憲	Ξ	三菱電機㈱
/	<i>y</i>		滑	石	直	幸	播磨耐火煉瓦㈱
,	7		長名	\$]]]	安	利	科学技術庁無機材質研究所
1	1		林		武	志	品川白煉瓦㈱
,	7		古	海	宏		黒崎窯業㈱
,	7		水	野	正	雄	通産省名古屋工業技術試験所
,	7		若	林		明	東京窯業㈱
,	1		Ш	田	栄		础日本電機工業会
,	/		笠	原	七	郎	//

(※印は幹事)

太陽炉専門委員会,第2小委員会委員名簿

(アイウエオ順)

			氏		名	所属
主	査	野	f D	哲	男	通産省名古屋工業技術試験所
委	員	材	目質	頌 頌	一郎	信越半導体㈱
1	/	旫	日石	雅	夫	東北金属㈱
1	,	※ 隽	l e	善	弘	日本電気㈱
1	/	过	-	俊	郎	//
1	,	中	□ 西	ī 栄	治	元揖斐川電気工業㈱
1	/	中	□ 村		毅	日本電工㈱
1	<i>,</i>	· 7	畐 涓	Ł	勉	日本重化学工業㈱
1	y	7	大 里	鹶 正	雄	通産省名古屋工業技術試験所
,	y	Ĺ	Ц	1	喬	慶応義塾大学工学部
,	y	柞	黄 日	1 幹	夫	信越半導体㈱
· •	1	Ļ	ЦВ	3 栄		钳日本電機工業会
,	y	4	变 厞	〔 七	郎	//

(※印は幹事)

太陽炉專門委員会, 第3小委員会委員名簿

(アイウエオ順)

		E	£	1	名	所属
主	査	柳	下	和	夫	三菱電気㈱
委	員	佐人	木		惇	三菱重工業㈱
1	,	塚	田	憲		三菱電機㈱
/	,	Ξ	木	季	雄	財日本工業立地センター
/	,	武	藤	勝	俊	三菱電機㈱
1	,	※柳		謙		三菱重工業㈱
,	,	吉	田	作	松	財日本気象協会
1	,	Ш	田	栄		钳日本電機工業会
. 1	,	笠	原	七	郎	//

(※印は幹事)

太陽炉專門委員会報告書

一昭和51年度一

目 次

1	緒	論	•••••	······································	1
	1.1 緒	e I	言		• 1
	1.2 各	委員	会の活動	か経過のあらまし	1
	1. 2. 1	太	陽炉専門	月委員会	• 1
	1. 2. 2	第	1小委員	夏会	2
	1. 2. 3	第	2小委員	曼会	. 3
	1. 2. 4	第	3 小委員	€会 ·····	4
	1.3 海	手外の	動向 …	• • • • • • • • • • • • • • • • • • • •	5
2	溶融耐	l 火物			7
	2.1 緒	i	言・		7
	2.2 第	1小	委員会の)活動経過	7
	2. 2. 1	第	5 回第 1	小委員会	7
	2. 2. 2	第	6 回第 1	小委員会	8
	2. 2. 3	第	7回第1		8
	2.2.4	第	8 回第 1	小委員会	9
	2.3 遠	心回	転空洞炉	³ と耐火物の溶融	9
	2. 3. 1	ź	えがき		9
	2. 3. 2	溶	融試料	· ······	9
	2. 3. 3	溶	融方法		10
	2. 3. 4	溶	融状態の)観察	12
	2.4 ジ	ルコ	ンサンド	*の溶融	13
	2.4.1	ま	えがき		13
	2.4.2	溶	融物の外	*観	13
	2.4.3	解	析結果		13
	2.4.4	ま	ද හ	,	21
	2.5 Д	ライ	トの溶融	虫	21
	2. 5. 1	な	えがき	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	21
	2. 5. 2	溶	融物の外	▶観 ·····	22
	2. 5. 3	解	析結果		24
	2. 5. 4	ま	とめ		35
	2.6 溶	融耐	火物製造	きの経済性検討	3 5
	2.6.1	ŧ	えがき		35

	2. 6. 2	太陽炉溶融耐火物と電融耐火物の品質の比較	35
	2. 6. 3	高融点材料のエネルギー量 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	40
	2.7 無重	重力場における太陽炉の利用	40
	2.7.1	まえがき	40
	2.7.2	無重力場における高温材料の挙動	40
	2. 7. 3	太陽炉の利用	43
	2. 7. 4	まとめ	44
	2.8 結	言	44
3	シリコン	/の生産プロセス	45
	3.1 緒	흄	45
	3.2 第2	?小委員会の活動経過	45
	3. 2. 1	第8回第2小委員会	45
	3 . 2. 2	第9回第2小委員会	46
	3. 2. 3	第10回第2小委員会	46
	3. 2. 4	第11回第2小委員会 ·······	46
	3. 2. 5	第2小委員会分科会の活動経過	46
	3.3 Si	太陽電池実用化のための諸条件の考察	47
	3. 3. 1	まえがき	47
	3. 3. 2	原料供給能力からの考察	47
	3. 3. 3 ₋	エネルギー回収率からの考察	49
	3. 3. 4	将来システムにおけるエネルギー回収率改善指向	50
	3. 3. 5	太陽電池のコスト問題	53
	3. 3. 6	ERDAプロジェクトの概要	53
	3. 3. 7	太陽電池用新技術へのアプロ-チの一例	56
	3. 3. 8	まとめ	58
	3.4 第1	. ステップ (粗シリコンの製造について)	60
	3. 4. 1	まえがき	60
	3. 4. 2	第1ステップの経過	60
	3. 4. 3	第1ステップにおける太陽炉の利用	61
	3. 4. 4	解析結果	65
	3. 4. 5	まとめ ······	67
	3.5 第4	コステップ(太陽光による多結晶シリコンの製造)	67
	3. 5. 1	まえがき	67
	3. 5. 2	装置の構成	67
	3. 5. 3	反応条件の設定	71
	3. 5. 4	解析結果	72
	3. 5. 5	まとめ	75

з

3.6 結 言	75
4 大型太陽炉の経済性分析・保守・安全と化学反応を伴う高温操作	76
4.1 緒 言	76
4.2 第3小季員会の活動経過	76
	76
4.2.2 第6回第3小委員会 <i>····································</i>	77
	77
	77
	78
	78
	78
	96
	80
	86
4.4.2 炉心部のエネルギー効率 ····································	86
4.4.3 炉の稼動率向上	89
۰ 4.4.4 \$ کې ۲۰۰۰ ۲۰۰۰ ۲۰۰۰ ۲۰۰۰ ۲۰۰۰ ۲۰۰۰ ۲۰۰۰ ۲	91
4.5 太陽炉の保守	92
4.5.1 まえがき	92
4.5.2 太陽炉の構成機器と保守	92
4.5.3 まとめ	93
4.6 安全性	93
4.6.1 まえがき	93
4.6.2 太陽炉施設自身の安全性	93
4.6.3 太陽炉施設員, 付近住民, 見学者の安全性	95
4.6.4 まとめ	96
4.7 公 害	96
4.7.1 建設前	96
4.7.2 建設中	97
4.7.3 完成後	••• 97
4.7.4 取壊中および取壊後 	98
4.8 太陽炉によるカーボランダムの製造	98
4.8.1 まえがき	••• 98
4.8.2 カーボランダムの製造法	99
[°] 4.8.3 カーボランダムの生成 ······	100
4.8.4 太陽炉によるカーボランダムの製造	101
。 4.9 高温ガス反応への利用 ····································	101
4.9.1 まえがき	101

4.9.2 加熱方式	102
4.9.3 高温高圧反応プロセスへの太陽炉の適用例	102
4.9.4 まとめ	105
4.10 蓄熱材料	105
4.10.1 まえがき	105
4.10.2 化学反応の選択基準	106
4.10.3 触媒利用化学反応	106
4.10.4 触媒を利用しない化学反応	106
4.10.5 まとめ	108
4.11 太陽炉の立地条件に関係する直達日射量について	108
4.11.1 まえがき	108
4.11.2 日本における直達日射量マップの作成	109
4.11.3 鹿児島県の直達日射量についての二,三の統計(特に0.4および0.6KW/m²レベルの日射	
量について	120
4.11.4 結果の利用上の注意	126
4.12 太陽炉の立地条件	129
4.12.1 まえがき	129
4.12.2 太陽炉の立地条件	130
4.12.3 実験炉の候補地の考察	131
4.13 結 言	135
5 ま と め	136
6 太陽炉専門委員会の研究成果のまとめ	• 137
6.1 まえがき	137
6.2 昭和49年度の活動と研究成果	137
6.3 昭和50年度の活動と研究成果	137
6.4 昭和 5 1 年度の活動と研究成果	138
6.5 結 言	139

1 緒 論

1.1 緒 言

太陽炉専門委員会においては昭和49年,50年 に引続いて大型太陽炉と,それに関連した高温熱利用ならびに一 般産業用高温熱源との関係を追求してきた。

初年度においては大型太陽炉の概要,構造,現在までの経過,利用状況の調査に併せて高温産業のエネルギー需給の動向調査を行い,1,000 KW大型太陽炉の概念設計を行った。

50 年度では本専門委員会内に第1,第2,第3小委員会を設け、それぞれ溶融耐火物の生産、金属特にシリコンの生産、および化学反応を伴う高温プロセスの3項目について研究調査を実施した。また専門委員会としても太陽炉利用目的の詳細分析と経済性について調査を進めた。

最終年度においては、これまでの研究調査活動のまとめを行い、大型太陽炉の太陽エネルギー利用開発課題の中に 占める位置を明らかにし、かつサンシャイン計画における位置づけ、その役割り、機能等について考察を加えた。研 究活動そのものについては前年度の委員会構成を踏襲して、それぞれの分野において前年度積み残した課題の検討を 終えるとともに、次のような形で研究調査を実施した。

すなわち

太陽炉第1小委員会:太陽炉による溶融耐火物の生産,無重力下における太陽炉の利用の可能性の検討

太陽炉第2小委員会:太陽電池用シリコンの太陽炉による生産の可能性の検討

太陽炉第3小委員会:太陽炉の経済分析、安全性とメインテナンス,立地条件の検討

太陽炉の光学系は太陽エネルギー利用技術の中でも,最も精度が高く,かつ高温の操作を必要とするので,太陽 冷暖房,給湯は勿論太陽熱発電技術よりも機器コンポーネントの高精度化が要求され,したがって経済的にも困難度 がより高くなることは否定できない。如何にして安価かつ高精度のパラボラ鏡,ヘリオスタット平面鏡,追尾システ ム等を製作するか,かつその信頼性,耐候性を高めるか等の問題は,本専門委員会のみならず太陽エネルギー利用シ ステム専門委員会の課題というよりは,むしろ機器ハード面の研究開発の課題であり,現在の太陽熱発電の分野にお けるそれとも一致するものと考えられる。

しかしながら長期的な観点から見て、化石燃料、核エネルギー等が高温熱源として利用し難くなる傾向は21世紀 には早晩訪れるものと考えられることから、代替エネルギー資源による高温熱源としての太陽炉の重要性は将来高ま るものになると見られる。

1.2 各委員会の活動経過のあらまし

昭和 51 年度における太陽炉専門委員会ならびに第1~第3小委員会の活動経過は次の通りである。各委員会とその審議項目を次に掲げる。

1.2.1 太陽炉専門委員会

第12回太陽炉專門委員会 51年5月24日

a) 昭和51年度の太陽炉専門委員会運営,活動方針の討議

b)新たに立地条件の検討のため第3小委員会委員追加

第13回太陽炉專門委員会 51年8月19,20日

a) 東北大学科学計測研究所太陽炉施設訪問(第1小委員会との合同委員会)

-1 -

- b) 昭和 5 1 年度活動方針決定
- 第14回太陽炉專門委員会 51年12月8日
- a) 各小委員会の活動状況報告
- b)トータルシステム委員会への参加体制
- c) 報告書作成に関する討議
- 第15 回太陽炉專門委員会 52年3月10日
- a) 51 年度報告書のとりまとめ
- b) トータルシステム委員会への報告書の件

配布資料:

- 1. 太陽炉專門委員会, 第1~第3小委員会委員名簿
- 2. 50年度サンシャイン計画委託調査研究成果報告書(太陽エネルギー利用システム調査研究:太陽炉)
- 3. 東北大学科学計測研究所要覧1976
- 4. Construction of a Large Solar Furnace (桜井ら他)
- 5. 太陽エネルギー技術開発計画(サンシヤイン計画推進本部)
- 6. 太陽炉の立地条件
- 7. トータルシステムW.G.資料(太陽エネルギー利用研究について)
- 8. 太陽炉専門委員会第3小委員会報告書目次案
- 9. トータル システムW.G.提出報告書(第5章)
- 1.2.2 第1小委員会

第5回太陽炉第1小委員会 51年6月15日

- a) 昭和51年度活動方針検討
- b) 無重力下の太陽炉の挙動についてフィージビリティ スタディ実施を決定

第6回太陽炉第1小委員会 51年8月19,20日

a)太陽炉専門委員会との合同委員会

第7回太陽炉第1小委員会 52年1月25日

a) 遠心空調炉の溶融資料の検討

- b) 第1小委員会報告書のまとめ案
- 第8回太陽炉第1小委員会 52年2月24日
- a) 太陽炉溶融資料の検討
- b) 報告書まとめの形式について

配布資料:

1. 昭和50年度サンシャイン計画委託調査研究成果報告書「太陽エネルギー利用システム調査研究」太陽炉

2. 同上、綜合

- 3. 東北大学科学計測研究所要覧
- 4. Construction of a Large Solar Furnace (桜井ら他)
- 5. 太陽エネルギー技術開発計画(サンシヤイン計画推進本部)
- 6. 太陽炉によるジルコンの溶融試験 (古海委員)

7. ムライト(3A1₂O₃・2SiO₂)について (木村,太田委員)

8. 遠心空調炉について (水野委員)

9. ジルコンサンドの溶融 (古海委員)

10. 試験体の溶融 (水野委員)

11. 溶融ムライト(大中,木村,太田委員)

12. 報告書まとめ形式について (太田委員)

1.2.3 第2小委員会

第8回太陽炉第2小委員会 51年6月16日

a),第2小委員会の委員構成について

b) 51 年度研究スケジュールについて

第9回太陽炉第2小委員会 51年10月1日

a) 各分科会(第1~第5ステップ)の現状報告

第10回太陽炉第2小委員会 51年11月12日

a)反応容器に関する報告

b) Siの分析,確認方法について

c) 第 5 ステップの取り扱いについて

d)報告書の作成について

第11回太陽炉第2小委員会 52年2月3日

a)報告書のまとめ

b) Si の分析,確認法の検討

配布資料:

1. 50 年度サンシャイン計画委託調査研究成果報告書(太陽エネルギー利用システム調査研究:太陽炉)

2. SiO₂ → Si 炉図

3. SiO₂ → Si 装置図

4. HSiCI₃ → Si 炉図

5. SiO_2 + 1.0, 1.25, 1.5, 1.75, 2.0 C X線チャート

6. 昭和51年度委員会開催状況並びに報告書関係案

7. 第1ステップ報告書原案

なお第2小委員会分科会の活動状況は次の通りである。

第6回第2小委員会分科会 52年5月19日

a) X線解析手法の報告 (水野委員)

第7回第2小委員会分科会 52年7月23日

a)反応容器の検討と反応の解析

第8回第2小委員会分科会 51年8月27日

a)反応容器システムの検討

第9回第2小委員会分科会 51年12月22日

a) 反応容器の検討

b) Si の分析法の検討

配布資料:

- 1. 溶融資料の外観および構成相
- 2. X線, 螢光X線分析法
- 3. 炭火珪素の結晶構造と諸性質との関係
- 4. 試料支持装置案
- 5. 第14 回太陽炉専門委員会議事録
- 6. 昭和51年度報告書作成案
- 7. Si の分析法
- 1.2.4 第3小委員会
 - 第5回太陽炉第3小委員会 51年7月16日
 - a) 昭和 51 年度第 3 小委員会活動方針
 - b) 大型太陽炉の経済分析
 - c) 太陽炉の立地条件
 - d) 太陽炉の安全性とメインテナンス
 - 第6回太陽炉第3小委員会 51年9月21日
 - a) 太陽炉の立地条件
 - b) 太陽炉の経済性
 - c) ガス反応による蓄熱
 - d)太陽炉の安全性とメインテナンス
 - 第7回太陽炉第3小委員会 51年11月16日
 - a) 太陽炉の公害問題
 - b) 太陽炉の経済性
 - c) 大型太陽炉の立地条件
 - d) 太陽炉の安全性
 - 第8回太陽炉第3小委員会 52年1月18日
 - a) 太陽炉の立地条件
 - b) 太陽炉の経済分析
 - c) 51 年度報告書の作成について

配布資料:

- 1. Preparation of Monthly Mean Global Solar Radiation Maps (Part 1)
- 2. 同 上
- 3. Parametric Representation of Ground Antennas for Communication System Study

(Part 2)

- 4. Solay Furnace and Their Applications
- 5. Economic Factors in Furnace Design
- 6. ガス利用について

- 7. 太陽炉の安全性
- 8. 太陽炉の経済性
- 9. 太陽熱発電パイロットプラント建設用地の選定調査
- 10. TAにおけるインパクトのチエックリスト
- 11. TAにおけるインパクトの評価結果(太陽エネルギー利用)
- 12. 第3小委員会報告書目次
- 13. 太陽炉の立地条件に関係する直達日射量について
- 14. 太陽炉の経済分析-太陽炉で利用できる日射強度

1.3 海外の動向

最近太陽エネルギーの利用の研究開発に関する先進各国の努力は益々加速されて、太陽熱発電、太陽光発電、太陽 冷暖房、給湯技術等を中心にR&D and DつまりResearch & Development and Demonstration の方 向に向いつつある。これらの他に海洋温度差発電、風力発電、Bio-conversion等も太陽エネルギー開発の課題に 加えた研究の推進と共に、開発途上国の要望に応えた農業用太陽エネルギー技術すなわち木材、穀物等の農産物の乾 燥、灌漑用水ポンピング、太陽熱蒸溜による淡水化等への研究開発も米、仏、独、ソ連等の各国で積極的に進められ ている。これらの諸国では先述のdemonstration にも相当の意慾を見せ、発電、冷暖房、農業面への利用等に合 わせて数十~数百億の予算を投入して、それら技術の普及化に対する努力が払われている。わが国のサンシヤイン計 画においては現在R&Dのみを中心に推進されているが、何れにせよ早急にR&D and D の体制の強化が計られる ことが太陽エネルギー技術の研究開発の促進と普及化に必要であると考えられ、この方向に沿っての努力が払われる ことを期待したい。

昭和 51 年度には8月カナダのウイニベグにおいて国際太陽エネルギー協会のアメリカ支部とカナダ支部の合同シンポジウムが開かれ,1000 名以上の参加者を得て盛大な会議が催された。発表論文は10 巻の予稿集(各巻 300 頁程度)にまとめられて,開発政策から各種機器コンボーネント,太陽エネルギー諸技術等について活発な討論が行われた。

また太陽冷暖房,給湯分野では昭和51年10月に独 Wiehl においてIEAの国際協力に関する専門家会議が さらに昭和52年3月にはペリで初の理事会が開かれ,加盟諸国間の国際協力が,システム解析,各種機器コンホー ネントの開発,コレクタ試験法, 簡易日射計,日照データ処理等の5つの分野で積極的に進められつつある。

さらにローマクラブとアルジェリア主催による第三世界の開発を背景とした新国際秩序の建設に関する国際会議が アルジェで、またメキシコ政府主催による同じような性質の会議がメキシコで開催され、今後のエネルギー資源の開 発における太陽エネルギー資源の重要性が強調される等太陽エネルギー技術に対する関心の高まりは世界各国の注目 を集めている。

一方フランスのオデイヨにおける 1.000KW太陽炉では、仏CNRSの太陽エネルギー研究所と米国ジョージア工科 大学ならびにマーチンマリエッタ社の共同研究により太陽炉の炉心におけるタワー集光型発電のボイラ試験が終了し その後同太陽エネルギー研究所では 1.000KW(熱出力) 太陽炉を用いて太陽熱発電の実験を開始した。口径54 m の放物面反射鏡に向って左側の空間に 30 ㎡の蓄熱槽と熱交換器ならびにターボ発電機を設置し、熱媒にTerphenyl hydrogeneを用い、蓄熱槽の出入口温度はそれぞれ 33 5, 235℃、流量 13.300 kg/h として 2時間の蓄熱が可 能であるとしている。また熱交換器-タービンのサイクルは水蒸気を用い、270℃、1300 kg/h で発電を行い、

5 MW の発電プラ が今後の実験結果の発表が待たれる。これらのシステムの概略は図1.1に示す通りであり, ۲ DF より進められているといわれる。 $\widehat{}$ フランス電力公社)へ送電を開始した。電力容量はまだ確定的な情報がなく, ントを1980年頃までにプロバンス地方に建設する計画がCNRS, EDFおよびSEPELの三者 約80 KW程度と 今後この実験を基礎に10 も伝えられる



図1.1 V ビン к Odeillo Ø 1.000 K₩ 太陽炉における発電システム

- 6 -

2 溶融耐火物

2.1 緒 言

溶融耐火物は種々の優れた性質をもっていることは言うまでもないが,難点はエネルギー多消費型であり,高純度或 いは均一複合体を製造する場合はさらに多量の電力を消費するものである。しかしトータルエネルギーの節約を推進 する場合は高級耐火物の使用による窯炉の効率向上が大きな寄与率をもっているものと推論される。したがって現 状のプロセスから得られる溶融耐火物よりさらに優れた品位,特性を目標とし,併せてエネルギー源転換を行うこと がこれからの課題であって,この要請は今後益々強くなる趨勢にある。

昭和50年に新しく第1小委員会が発足して太陽炉による各種の高温材料の溶融法を検討し,それら溶融物の特性の解析を行った。

この初年度の研究成果は |) 溶融が瞬間的に行われるために非常に微細な針状,樹枝状結晶構造の組織をもって おり,通常の電融耐火物に比較してかなりの歪みをもっている傾向が見られるものであり, ||) 多成分系固溶体組成 の溶融物は再加熱によって結晶生長が大きく,また離溶現象が著しいものもあることなどが明らかになった。

これらの初年度の調査研究結果を得て昭和51年度のフイージビリスタデイは次のようなテーマを設定した。

(1) 炉心部構造として遠心回転空洞炉により $A1_2O_3$, $3A1_2O_3$ ・ $2SiO_2$, ZrO_2 , Zircon, MgO などを溶 融した場合の,所要エネルギーの検討,経済性の調査を行う。

(2) 新しいテーマとして「無重力下における太陽炉の利用」について調査する。

以上のテーマについて別項の委員会活動を行ったが初期計画の完全達成は四囲の情勢から困難性があったが、太陽 炉による溶融耐火物の製造は可能であるという結論が得られ、いくつかの特長も見出すことができた。

2.2 第1小委員会の活動経過

太陽炉専門委員会の5月24日開催の委員会において協議決定された第1小委員会のテーマとしては「溶融耐火物」 について継続検討を行う,また新しいテーマとして "Space"(特に無重力という点にポイントを置く)での太陽炉 の用途の調査研究を追加する。以上の研究テーマを基につぎのような活動を行った。

なお本年度委員は前年度と同様で,変更,追加は行わないことにした。

2.2.1 第5回第1小委員会 (昭和51年6月15日)

j) 本委託調査研究は3ヶ年間であるため昭和51年は最終年度となるので本専門委員会の調査研究の総まとめ となる。第1小委員会は"溶融耐火物の特性"と"無重力下における太陽炉の用途"の2テーマとする。また溶 融耐火物については経済性の検討も併せて行うことが提案された。

ii) 各委員会から昭和50年度の調査研究結果による本年度の実施計画につき種々の意見が提出された。

(1) 電融耐火物として工業化されている、 $A\ell_2O_3 - SiO_2$, $MgO - Cr_2O_3$, MgO, MgO - CaO等, の太陽炉溶融物は急熱、急冷によると思われる結晶の微細化が認められるがその他については大きな特長は見当らない。

(P) MgOの溶融に際し、いわゆる Smohe magnesia が発生するが、これは微細な単結晶でそれらのキャラクターを解析することが望ましい。

() MgO-CaO系ではMgO の揮発が単体の場合より抑制されるが、やはり柱状または樹枝状構造となるのでさらに研究が必要であろう。

(+) Zircon Sand 溶融物は解離した ZrO_2 , SiO₂ が微細な樹枝状構造となるが、太陽光の選択吸収効果があるのではないか、またこれらの溶融物からアルカリ抽出によってSiO₂を分離できるので ZrO_2 の製造に応用できるであろう。

は) **ZrO**₉は表面に薄層溶融帯ができるのでジルコニア系製品の表面処理として興味がある。

(1) 太陽炉による溶融物の製造は炉心部の構造と経済性の問題を解析することが必要である。また溶融物を製
 ,
 ,
 ,
 ,
 ,
 ,
 ,
 ,
 ,
 ,
 ,
 ,
 ,
 ,
 ,
 ,
 ,
 ,
 ,
 ,
 ,
 ,
 ,
 ,
 ,
 ,
 ,
 ,
 ,
 ,
 ,
 ,
 ,
 ,
 ,
 ,
 ,
 ,
 ,
 ,
 ,
 ,
 ,
 ,
 ,
 ,
 ,
 ,
 ,
 ,
 ,
 ,
 ,
 ,
 ,
 ,
 ,
 ,
 ,
 ,
 ,
 ,
 ,
 ,
 ,
 ,
 ,
 ,
 ,
 ,
 ,
 ,
 ,
 ,
 ,
 ,
 ,
 ,
 ,
 ,
 ,
 ,
 ,
 ,
 ,
 ,
 ,
 ,
 ,
 ,
 ,
 ,
 ,
 ,
 ,
 ,
 ,
 ,
 ,
 ,
 ,
 ,
 ,
 ,
 ,
 ,
 ,
 ,
 ,
 ,
 ,
 ,
 ,
 ,
 ,
 ,
 ,
 ,
 ,
 ,
 ,
 ,
 ,
 ,
 ,
 ,
 ,
 ,
 ,
 ,
 ,
 ,

III) 昭和51年度実施計画

(1) 遠心空洞炉による名工試太陽炉の溶融試験の検討

(中) 空洞炉による溶融の対称は溶融し易い一般的なものを選択し、重点的に解析し、経済性の検討の可能性を
 見出し得るように推進する。

() 溶融資料解析の担当

溶融機構 名工試 野口, 水野委員

ムライト原料 ……… 大中委員

ジルコンサンド並びにジルコン煉瓦 ……… 古海委員

溶融資料の微構造解析については次回委員会で協議する。

(=) 新テーマ「無重力下における太陽炉の利用」については文献調査を行うこと。

iv) 本年度委員会スケジュール

(1) 第6回第1小委員会,8月中旬に東北大学計測研究所の大型太陽炉の見学並びに委員会を専門委員会,第1小委員会と合同で実施する。

(中) 第7回第1小委員会,10月中に開催し,試料の解析その他を協議する。

(*) 第8回第1小委員会 52年1月研究報告のまとめを行う。

(1) 第9回第1小委員会 52年3月上旬報告書のまとめを行う。

2.2.2 第6回第1小委員会 8月20日

東北大学科学計測研究所の放物面口径10m, ヘリオスタット型大型太陽炉(同研究所製作)の見学を行った。 なお本委員会は専門委員会, 第1小委員会合同で行ったもので内容については省略する。

2.2.3 第7回第1小委員会

第7回委員会については各委員の日程の関係上.延期することとしてとりあえず11月中旬に野口,水野,太田の 3委員が名工試にて協議し,遠心空洞炉の溶融資料につき,その取り扱いその他につき決定した。遠心空洞炉での 溶融は比較的容易であるが溶融物の飛散,その他があり,多量に溶融することは安全対策の検討が必要と思われる。

なお第7回委員会は1月25日に開催し,遠心空洞炉の溶融資料についての各委員会の報告並びに今後のまとめ 方について協議した。

i) ジルコン溶融試料につき古海委員より報告があり、空洞炉溶融資料は、棒状試験片の表面瞬間溶融物に比較して微構造物的には大差ないが、解離ジルコニアの結晶生長は良好である。またジルコンれんがよりもジルコンフラワーの成型体がよく溶融していることが報告された。

ii) 木村委員よりムライトの空洞炉溶融物について主としてEPMAによる微構造解析結果が報告された。この 溶融資料は表面と内部で異なり,前者はAl-rich,後者はSi-rich のムライトの折出がみられ,組成の不 均一があるのではないかと指摘された。

-8-

ⅲ)これらの調査研究について

(1) 全体的に結晶生長が良好となっているがこれは溶融一冷却時間が長くなったためであろう。従って前年度にみられた微細な針状,樹枝状結晶の生成は太陽炉による溶融が短時間内に行われることによるものである。
 (2) 空洞炉の昇温→冷却時間の測定が可能であればこれらの効果が明らかになるので炉内の温度分布を知ることが望ましい。

(*) 空洞炉より飛散した小球状は中空球であるかも知れないのでそれらの内部構造を調査することが提案された。

2.2.4 第8回第1小委員会

i) 2月24日に開催し1) ムライト溶融物の解析結果(大中委員), ロ) 空洞炉より発生する球状溶融物の結果(木村委員)につき報告があった。

 (1) ムライト溶融物の微構造は瞬間溶融物より完全に溶融したもので方向性をもったムライトの柱状結晶が析 出している。ただし照射面で結晶は微細となり方向性が乱れてくる。

(中) 球状溶融物は中空球ではなく少量の気泡を含むが角状晶であること球状表面には一部針状晶がみられる。
 (i) 無重力下における太陽炉の利用については、無重力下における過去の研究につき文献調査を行い3月上旬までにまとめる(木村委員)

Ⅲ)本年度調査研究のまとめ

51 年度第1小委員会の報告書まとめについては,第2章1~7につき担当委員の原案が提出され,夫々をま とめることになった。

2.3 遠心回転空洞炉と耐火物の溶融。

2.3.1 まえがき

高温太陽炉による溶融耐火物の製造に関してはさきに名古屋工業技術試験所に設置されている光軸水平のヘリオスタット式2KW太陽炉に組み込んだ遠心回転空洞炉を用いて溶融が行われている。それらの試験溶融物の特性と組織 並びに構造解析を行った結果を紹介する。

2.3.2 溶融試料

溶融に用いられた試料は,

a) ZrO₂ • SiO₂ (ジルコンサンド, ジルコンフラワー)

b) $ZrO_2 \cdot SiO_2 (\forall n \exists \forall n h h h)$

c) $3A\ell_2O_3 \cdot 2SiO_2 (\Delta 51)$

であり、それぞれ旭硝子株式会社、黒崎窯業株式会社より提供されたものである。

ジルコンサンド,ジルコンフラワーの化学組成とジルコンれんがの品質を表2-1に示し,ムライトの化学組成を表2-2に掲げる。

	Ig.loss	S i O_2	TiO ₂	$A \ell_2 O_3$	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	ZiO ₂
ジルコンサンド	0.0 9	3 1,4 6	0.14	0.4 3	0.1 8	0.26	0.16	67.15
ジルコンフラワー	0.08	3 1,3 6	0.27	0.4 6	0.22	0.35	0.06	67.01

表 2-1 試料の化学組成と品質化学組成(分析値)

ジルコンれんがの品質

見	掛	比	重	カ	サ	比	重	見掛気孔率	%	圧縮強さkg/cm [*]
	4.6	4			3.4	2		2 6.2		438

表2.2 試料の化学組成

	SiO ₂	Al_2O_3	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ 0
ムライト	2 8.1 0	7 1.5 4	0.0 7	trace	trace	0.0 8

これらの原料を用いて作成した試料は円柱形,棒状および角型成形体である。

(1) 円柱形試料

ジルコンサンド,ジルコンフラワーおよびムライトの粉末試料について,それぞれを金型を用い圧縮成形機に より1,000 ~ 2,000 kg/cm² の圧力を加えて,30 × 30 mm \oint (約25 ~ 30 \oint)の円柱に成形した。さら に焼成ジルコンれんがから25 × 30 mm \oint の円柱状試料に切り出した。

これらの試料を金属製の遠心回転容器(31 cm, 深さ30 $mm \oint$)内部に充てんし溶融が進められた。 (ii) 棒状試料

粉末ジルコンフラワーおよびムライトを成形圧1.000 kg/cmで6×6×30 mmの角柱に成形した。

(ii) 角型成形試料

焼成したジルコンれんがで40×40×高さ25 mmのサイコロ型に切り出したものをそのまま使用した。

2.3.3 溶融方法

(1) 円柱形試料

円柱形試料の溶融には、太陽炉に組込んだ金属製の遠心回転空洞炉を用い空気中で溶融を行っている。参考のため図2.1,2.2および2.3に装置の概略図および写真を示した。



図 2.1 遠心空洞炉を設置したヘリオスタット式第2号太陽炉



図2.2 遠心回転空洞炉



図2.3 遠心空洞炉

溶融方法および溶融時間は試料によって異なるが、それぞれの試料について300 ~800 r · p · mの回転 速度で回転しながら溶融を行い,遠心力の作用で内壁方向におさえつけ空洞を形成させ、るつぼ状のものを作成 した。

(jj) 棒状試料

棒状試料については, 試料を回転速度8 r.p.m昇降速度6 mm/minの条件でそれぞれ溶融した。

(ii) 角型成形試料

角型成形試料は,溶融装置の受皿上に置き昇降速度mm/minの条件で溶融を行った。

以上の溶融操作は, 放物面鏡の前面に取りつけたベネシアンブラインド型シャッターを用いて入射光量を調節 して行い, 数秒~数分間加熱し定常状態に達せしめた後, シャッターの急速な閉鎖により急冷した↓のである。 以上の試料の加熱溶融状況は次の通りである。

2.3.4 溶融状態の観察

各試料の溶融状態は表 2.3 にまとめた通りである。

(i) $ZrO_2 \cdot SiO_2$

ジルコンフラワーおよびジルコンの円柱形試料,棒状試料とも溶融まで数秒を要した。

ジルコンれんがは良く焼結されているため,熱吸収(気孔率の影響)が悪く溶融まで数分を要し,空洞炉での 溶融量は僅かである。

これらの各試料は溶融と同時にSiO₂の蒸発が観察された。この蒸発物は回転炉のオリフイス表面に付着する ことが認められている。

(ii) $3A\ell_2O_3 \cdot 2SiO_2$

ムライトの円柱形試料、棒状試料とも、融点が低いため溶融までの時間は数秒であった。

この試料は,蒸発が僅かに認められたが,照射溶融の際に径3~5mm程度の溶融塊がオリフイス外に吹き出した。この現象は溶融および凝固中の発泡現象に伴うものと考えられる。

符	号	成 分	試料の性状	溶融方法
	A	ジルコンフラワー	遠心回転空洞炉で回転速度300 ~ 800r.p.mで	2. 3. 1
		· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	10 分間溶融した試料	
		ムライト	"	"
	В	ジリコンフラワー	成形圧 1,000 kg/cm [*] で6×6×30 mmに成形し溶	2. 3. 2
			融した試料	
		ムライト	11	
	С	ジルコンサンド	Aと同じく遠心回転空洞炉で溶融した試料	2. 3. 1
		ムライト	▲と同じく遠心回転空洞炉で溶融した際にオリフイス	"
			外に吹き出した試料	
	D	焼成ジルコンレンガ	円柱状試料を切り出して溶融した試料	"
	E	<i>"</i>	Dに似た形の試料(サイコロ型)	2. 3. 3

表2.3 供給試料の性状

2.4 ジルコンサンドの溶融

u.4.1 まえがき

太陽炉によって溶融したジルコンサンドの解析結果は,昭和50年度の研究成果報告書において報告した。この 報告では溶融物が太陽炉の特徴である非常に急速な冷却によって,単斜晶系ジルコニアと非晶質シリカに解離して いるため,当初の目的としたジルコンの溶融粒としての使用は不可能であるが,この溶融物より非晶質シリカを化 学処理によって除去してジルコニアを製造することは興味がありそうであると結論した。

本年度は名古屋工業技術試験所に設置されている遠心回転空洞炉を用いて溶融されたジルコンサンドとフラワー や、同時に溶融した角柱状の粉末成形試料や、焼成れんがを対象として解析してその組織の比較を行った。 2.4.2 溶融物の外観

試料A~Eの外観および切断面の状態を図 2.4~図2.8に示す。

試料A;内側表面はガラス化し,図2.6図のようにa層:淡褐色の細かい縞のある部分(厚さ1~2mm),b層:その外側(厚さ約2mm)の白色緻密な部分,c層:最外側(厚さ2~3mm)の淡褐色で指頭で容易に崩れる部分の3層に分けられる。

試料B;淡黄白色,緻密堅固な豆状(経10 ~15 mm)を呈し,表面はガラス化して内部 には球状の小気孔が点在する。

試料C; 試料Aに似た外観であるが各層が やや薄く, またその境界が不明瞭である。外 側の未変質部は強度がなくほとんど脱落して いる。

試料D; 試料A, Cに似た縞模様があり, a層, b層共厚さ約1 mmでその下部は原れん が組織になっている。

試料E;れんが表面の照射部分は試料Bと 似た外観(厚さ4~5mm)を呈し,試料A,
C, Dのような縞状組織はない。原組織に接 する部分に厚さ0.5~1.0mmの焼結層がある。
2.4.3 解析結果

(1) X線回析

試料BについてのみX線回解を行ったが 昭和50年度の研究成果報告書と同様にジ ルコニア(単斜晶系)と少量のジルコンが 検出された。



図 2.4 試料A.Bの外観 × 2.0







図 2.6 試料Aの断面スケッチ

-13-

非活晶器、たるいフに知るたんじいらて ニロバシオン
糖報
の
教同
多(
層
d
)
人
路 の色白の側秒のろ。そあう遺野 m 4 0 5 お晶語のてニヒハシ。 る・ノフノ靴充を渕 間の子はなじ、、J呈き晶跡の状効樹お →ま状述約て=ヒハシ。(01-5図) い考大で 代暗 色縣 、 > 多小 ご 代 陪 当 自 約

晶語、シのよるよう小小大の晶語でニヒハ ◇お熱弊諦。るなるはん() ∨ らてニヒハ やけし 糖糖 いくよの 6.2 図 おう 不蔵 お割

2図)。いおいてし賀変さんと知知(層

○) 代倍 当 財 強 の 順 代 の チ 別 更 。 る れ る &臨祢所浸小の状粧がさまの11.2図約 7) 近付界款の層 d 、 B ナ キ 、 > S 小 7) 常

A 採麺(|

8 採焙(∥

15)

。オビ行フィンCJA倍く組またそれのゴ て全的察路の不し、うのい歌が常非野いが きご察師さんとおよご競燈腿おれる、れる

パブリ漁車はホモモおり3面素よく伴焼全

義樹艱学光 (2)





2.2 🔀

1.1× 腸松の∃.C.D.将病

图2.8 試料C.D.E ① 切断面 × 1.3

J 淋矯 (Ⅲ 。小圣论图, 灵小步 0 1 特結の計約3階内さま。るあう選野 mu 95大量>を小やや01A株満約晶結状述のてニヒハシ。るパブノ螯 発泳晶論で代留 オードン 実施かりなお 単限 肤おい 新発の 晶語 。る あ ま 他 いき大 な晶語 つ 的 み 暗 い き よ い

図さま。いき大な晶誘ややおご暗内> らいな晶談お(暗土式の EI 2 図)面表、ご教同らA 料類お知路破壊

古の 812図) るいフに飲みばくに れぐの 質変末的 1 順位最 (812図)。るもう 熱同さんら約5 4 洋満 よどなを考大の晶端、激跳、効跳ば速の代暗のご、ℓ & な(層 d) 白白い駒枠のそく教薬論な教団くA 体満

U 淋 / ⊂ (Vi 。(歂

。るいファンは洗油精油のイビバシ、花いなら変くたんれ見てん役れ癬魚の倍詰糖(112 、 712 2) 。るます耕同JA株海当へぼ紡織腺の代倍輻熱。るな01代倍諸親色白の側枠のチュ代倍蝠務るまの教製緜



図 2.10 試料 A の a 層の 縞状組織 × 165

と内部 (右下半分) ×165



(a層) (b層)



図 2.11 試料Aのab層の境界部 × 82.5 図 2.14 試料Bの内部結晶が発達した部分 × 165



内側表面 (a 層) (b 層) 図 2.15 試料Cのa 層の縞状組織 × 8 2.5

(a 層) (b 層) 図 2.18 試料Dのa, b 層の境界部分 × 82.5





未変質部(C 層) 焼結部(b層)

(b 層) 原れんが部分 図 2.16 試料 C の b, C 層の境界部分 × 8 2.5 図 2.19 試料 D の b 層と原れんがの部分の境界 × 8 2.5



表 面 内 部 × 8 2.5 図 2.20 試料Eの表面付近溶融部 imes 165

表 面

図 2.17 試料Dの a 層の縞状組織

(図2.19)

V) 試料 E

鉱物組成等は他の試料と同様である。結晶の 発達は他の試料に見られるような明瞭な規則性 はないが,表面では結晶が小さく内部で大きい 所が多い(図2.20)。

また図2.21 に示すようにジルコニア結晶の発 達の仕方が異る部分が見られる。原れんが組織 と接する部分(図2.22)および原れんが部分 は試料Dと同様である。

試料Aの観察で試料の最外側部分(図2.6の C層)はジルコンに何等変質が起っておらず焼 結も起っていないが、その内側(図2.6のb層) ではジルコニア,シリカへの解離と焼結が起っ ており, 縞状部分(図2.6のc層)との境界部 では球形の気泡も多数存在し, 解離したジルコ ニアの結晶も発達している。特に a 層では結晶 の発達が著しい部分も認められ、これらの点か ら少くともa層およびb層の一部までは溶融し ていたものと推察される。他の試料でも同様な ことが観察されるのでこれらの縞状および白色 部も溶融していたものと考えられ、これから類 推すれば前回の試料も焼結だけではなく,溶融 していたものと考えた方がよさそうである。但 し解離したジルコニア結晶は今回の試料の方が よく発達している。



図 2.21 試料Eに見られるジルコニアの結晶 × 165





(3) 電子顕微鏡

走査型電子顕微鏡(SEM)により試料A,D,Eの溶融物の破断面を観察した結果は,図2.23~図2.25 のように光学顕微鏡で観察されたと同様な粒状又は樹枝状組織が観察された。その状態はほご前報と同様に解離 したジルコニア(粒状,樹枝状)とシリカ(マトリックス状)から成り,各試料間であまり差異は見られない。 (4) E.P.M.A

EPMAにより各試料を解析した結果も、ほゞ前報と同様で各試料間にもあまり差異は見られないので、これ らの内試料Aの結果のみを図 2.26, 2.27, 2.28 に示す。これらの図は樹枝状、粒状を示す部分が解離した ジルコニアであることを表わしている。

これと同試料(試料A)について内側から外側(図2.6のa層からb層)へ走査した線分析の結果を図2.29 2.30, 2.31,に示す。図2.29(0~1 mnの範囲)では、ともにZr(実線)とSi(点線)の濃度が互に 逆の関係になっており、ジルコンの解離が起っていることを示す。また図2.29はピーク巾が狭く、結晶が小さ





図 2.23 試料 Aの樹枝状および粒状のジルコニア 図 2.24 試料 D 同 上 ×600 結晶 \times 600



図 2.25 試料Eの樹枝状および粒状のジルコニア結晶

 \times 600

試料: AのE.P.M.Aの解析

imes 1 2 5 0





図2.26 粒状部

 $\mathrm{Z}\,\mathrm{r}$

S i



図 2.27 樹枝状部

 \mathbf{Z} r

Si



図2.28 未溶融(解離部) 組 成 像

X線像 Zr

Si





-20-





囲) رَ ۱ 4 Clt Zr とを示し, 9A 3 F と Si の濃度が正の関係になっており、この部分ではジルコンが解離していないこ 図 2.30 はど ークの巾が広く,結晶が大きいことを表わし ている。 図 2.31 (5. とを示している。 cη 2 6.5 mmの範

 \sim 名工試の遠心回転空洞炉によるジルコン溶融試料と別に棒状に成形した不焼成試料や, 4 焼成れんがよ 5 切り取っ

た試片を照射して得た溶融ジルコンと 各溶融試料とも組織は昭和50年度の研究成果報告と殆んど同様であったが, ジルコニア結晶の発達は遠心空洞 ともに組織の解析調査を行った。

府による 遠心回転空洞炉による溶融は他の溶融試料と同様に溶融層, ものの方が良好であった。 焼結層が薄く, またジルコニア結晶の大きさにかな

9 のバラツキがあったが、結晶は他の試料よりも若干発達が良かった。

2.5 ムライトの溶融

2.5.1 まえがき

織に本質的な差異は認められず, 内部組織にしいても調査を行った。 の分離などを検討した。なお空洞炉による溶融では,小球状溶融物が炉外に飛散するためこれらの飛散したものの ることが指摘された。本年度は遠心回転空洞炉によるムライト溶融試料の解析を行い, 微細組織, た場合と、 ムライ 7 市販の同一組成の電融耐火物と比較を行い, 組成($AL_2O_3/SiO_2 \Rightarrow 3/2$)の溶融シリカとタ 連続し て均一な溶融物を得るためには溶融法ならびに炉芯構造の検討が必要であ その結果を昭和50年度に報告した。 スセン ーアルミナ配合物を太陽炉によって溶融し この報告では結晶組 鉱物組成, 組成



図 2.3.4 断面の拡大写真(約 2.2 倍)

内側表面は半透明の蠟色をしており針状結晶の発達が肉眼で観察できる。この層はルツボ上壁で約3 mmの厚さに なっているが、下方に向って徐々に薄くなり底部で約2 mmである。この外側には約1 mmの不透明な白色層が生成し ており、更にその外側は未溶融の原試料で焼結していないためにくずれやすい。

粒の中央に原試料と思われる未溶融の部分が残っている(形状は長方形で $4 \times 1.5 \text{ mm}$)半透明な部分と白色の部分が混在すると共に大きな(約 $1 \text{ mm} \phi$)泡が観察される。





図 2.36 試料 Bの断面拡大写真(約3倍)

2.5.3 解析結果

(1) 溶融物の化学分析

溶融物部分と未溶融部分の化学分析を行った結果,溶融部分はAℓ₂O₃が減少していることが認められた。し かしX線分析ではムライト構造であり、EPMA分析では $A\ell_2O_3$ /SiO₂組成比が異なる部分があるので両成 分が僅かながら偏在しているものと考えられる。

			化	学	分	析		結	果	
	溶	融	部				未	溶	融	部
${ m SiO_2}$	(%)			2 9.4	5			2 7	7.93	
$A\ell_2O_3$	(%)			70.4	3			7 1	1.05	
モル比(AL203/	ŚiC)2)	1,4 1	0			1.4	199	

(2) X線回折

試料A.Bとも溶融層からサンプリング (原試料と思われる部分は含まない) してX 線回折を行った。同定さ た鉱物はムライトのみで、 $\alpha = A \ell_2 O_3$, SiO₂ 結晶は同定されなかった。

(3) 顕微鏡組織

試料を中央で切断し、この断面を薄片にして偏光顕微鏡により観察した。

試料A ……… 断面観察で見られた3層が同じように認められる。

a) 半透明層: (図 2.37)

完全に溶融し再結晶化したムライト結晶で構成されている。外側の半溶融白色層から加熱面に向って柱状の 結晶がよく整列されて伸びているが、加熱面近くでは結晶は比較的小さくなり方向性に若干乱れが見られる。

b) 白色化層および原試料部

白色化層は半溶融状態にあった層と思われ、かなり緻密な微細なムライト結晶から成っている。この外側 の未溶融原試料層との境界には丸い気泡が多く存在する。

試料 B :

溶融再結晶のムライトの柱状結晶の緻密な集合体から成り、結晶配列は試料Aに比較すると方向性が少く また空隙も多い。

試料の中央部に原試料と思われる未溶融部が残っている。

(4) E.P.M.A. による分析

構成結晶相並びにマトリックスの元素分布を検討するため, E.P.M.A.により測定を行った。

(i) 微細組織観察

E.P.M.A.の測定面につき,まず光学顕微鏡により微細組織を検討した試料の微構造はおおよそ3種に分 けられる(図2.40)。第一は加熱面側の均一な結晶相である(以下【相)。これは半透明の蠟色部分に相当 する。組織はきわめて均一であるが数十~100 μm 程度の異質の針状結晶が析出している。また 30μm 以 下の気孔が認められるが、100μm程度の大きな気孔はI相より外側に多く観察された。I相の外側(以下Π 相)は未溶融と思われる粒子が数多く点在しているが、一部に針状または板状に結晶が析出したモザイク状の 溶融部分が観察された。最外側は未溶融部分である。



図 2.37 試料Aの半透明層(クロスニコル×60)



図 2.38 試料Aの内部(クロスニコル×60)



図 2.39 (クロスニコル ×60)






↓図5の線分析位置



反射電子線像

Al Ka 線像

Si Ka 線像

4 0 µm









反射電子線像



Al Ka 線像

Si Ka 線像

-

4 0 μm



図 2.45 EPMAによるⅡ相の線分析

(ii) E.P.M.A.による測定

顕微鏡観察に用いた試料に炭素を蒸着した後, I相及びII相についてAL, Siの分析を行った。分析条件は 20kv, 0.01 μ A, ADP(Si K α)KAP(A ℓ K α),X線取出し角52.5° である。半定量分析用の標準 試料にはAL₂O₃,SiO₂ の単結晶を用いた。線分析の結果を図2.41 に示す。

面分析から I 相は A l rich のマトリックスからなり,析出部は Si rich であった(図2.42)。 線分析の結果,マトリックスには試料の半径方向,深さ方向に A l, Si の濃度変化は見られなかった(図243) 定量分析は,特に析出部では線分析を行いながら Si rich のところでビームを固定し定量したが,どの析 出粒子もほぼ同じ濃度であった。 $A l_2 O_3 \ge Si O_2$ のモル比は 3 : 2 に比べてマトリックスは $A l_2 O_3$ rich であり,析出部は SiO₂ rich であった。析出部の量がわずかであることを考えると, I 相は全体と してかなり A l_2 O₃ rich であるがこれは溶融中に SiO₂が蒸発したことによると思われる。

Ⅱ相については未溶融の粒子がないと思われるモザイク状の部分について分析した。面分析の結果, I相と は逆に析出部がAℓ rich で,マトリックスがSi richであった(図2.44)。定量分析は同様に行い, 同一組成の結晶が析出していることを確認した。モル比は析出部で約3:2でありマトリックスはこれより, SiO₂ rich であった(図2.45)。

以上EPMAにより、II相中の溶融部ではSiO₂ rich のマトリックスから3A $\ell_2O_3 \cdot 2SiO_2$ 組成と思われる針状ないしは板状の結晶が析出していることがわかった。一方加熱面に接しているI相では一部SiO₂ rich の結晶が析出しているが、全体としてはかなりA ℓ_2O_3 rich であることがわかった。

EPMAの分析結果から I 相が3:2の組成比より $A\ell_2O_3$ に富むことが指摘されたので、I 相の同定が 必要となった。このためダイヤモンドカッターで I 相以外の部分を削りおとし粉末X線回折を行った。測定は Cu Ka, 40kv, 20mA, スリットは1-0.3 -1, 2°2 θ /min, (格子定数は $\frac{1}{4}$ °2 θ /min)で行った。

回折線はムライトの他に、d = 2.52 Aの2本の未知回折線 が検出された。これにつき $A\ell_2O_3 - SiO_2$ 系の化合物で検 討したが、その帰属を決定できなかった。しかし、I相がほと んどムライトからなり $A\ell_2O_3 - SiO_2$ 系の他の主だった結 晶が存在しないことが確認できた。そこでSiを内部標準に用 いムライトの格子定数を測定した。(401)回折線の強度が 低かったので(003)、(041)、(331)回折線を使用 して計算した。結果はa = 7.585 A、b = 7.684 A、

 $c = 2.886 \text{ \AA}$ でありa / b, $c / b \delta Smith$ の図表で考えると既存の結果とかなりのずれがある。これは不純物の影響かあるいは SiO_2 の蒸発、大きな温度勾配、急冷などにより安定状態に達していないことが原因したと推定される。



(5) 溶融球状粒子の観察

遠心回転容器にて溶融する際,直径数mmの溶融球状粒子が生成している。その内部を観察するため,エポキン 樹脂に含浸し,赤道線を通る位置まで研磨,鏡面に仕上げて,光学顕微鏡にて観察した。その結果を図2.46~ 2.43 に示す。



図2.47 溶融球状粒子の微細組織(中間域)



(表示を番図お字 ()

蜀 动 察 賭 M 3 2 0 株 斌

。ゴリ察購アいつぶのよう」熱忱再到 2002.1 , 2001 1 50

。オオを察購はとこるを赤代られな量少は形灵习暗一、オを効構され本晶論をお暗内刃でよる

。いが必塞時とん形と時代で、 あつ、ゆら即ら、4果誘察購、なけれる既そら、1なれしま、4るあつ独空中なそば状紙のこ、おり前るで誠実を察購本

。るバノン水を効料され品諸状色 7. 強全 示語一 全晶諸状 後、 7. そよ で示 7. (d) 、 (g) 、 8 + 2. 図 、 13 (倍間 代) 、 7 + 3. 図 、 7 か 気間 中 3 - 5 4 品 水 色 4 2 年 元 7. (b) ~ (b) 、 7 + 3. 図 、 5. 15 支間 中 3 一 5 4 品 水 色 4 2 年 元 7. (b) ~ (b) 、 7 + 3. 図 、 5. 15 支間 中 3 一 5 4 品 水 色 4 2 年 元 7. (b) ~ (b) 、 7 + 3. 図



(2)





図 2.49(1)(2)(3),(4)に溶融表面を示すが角状晶と柱状晶がみられる。

図 2.49 (5), (6), (7)溶融層断面のSEM写真

(5)

. (1)







 $(\times 500)$

 $(\times 500)$

 $(\times 500)$

図 2.49 (5), (6)は溶融部分の断面, 図 2.49 (7)は未溶融部分であるが, 均一な構造でなく不均一層があること が推定される。

図 2.49 溶融層の SEM 写真



($\times 500$)

 $(\times 500)$

図2.49 (5),(6)に相当する対面の破断面であるが内部は亀裂や空隙が多いようである。

図 2.50, 2.51, 2.52 はそれぞれ小球状物のSEM写真である。



 $(\times 7000)$

(\times 3500)

(\times 7000)

小球状の表面を図2.50,内部破面を図2.51,図2.52に示すがさきの溶融物に比較して著しく微細な空孔を をもつ粒子が集合した状態がみられる。

図 2.53, 2.54 溶融層表面の再加熱物の SEM 写真

(1.400°C×1 hr)



(×140)

(×500)

図2.55,2.56 溶融層表面の再加熱物のSEM

 $(1.500 \text{°C} \times 1 \text{ hr})$

図 2.55





 $(\times 140)$

× 1.400

溶融物は再加熱によって結晶の粒生長が考えられるので、1.400 $C \times 1$ hr と 1.500 $C \times 1$ hr のアニーリングを行い図 2.53 ~ 2.56 に示した。

これらのSEM観察で明らかなように 1.400 ℃では粒生長はみられさいが、果粒状の析出物があり、これは離 溶現象が起きているのではないかと思われる。つぎに 1.500 ℃×1 hr の加熱徐冷によって著しい粒生長が観察 される。これらのことはMgO- クローム鉱系の溶融物と同様に耐火物として使用する場合、興味ある現象である。 2.5.4 まとめ

太陽炉の炉心で遠心回転炉を用いて、ムライト組成($A\ell_2O_3 / SiO_2 = 3/2$)の $A\ell_2O_3$, SiO_2 配合物 を溶融した場合の溶融物について顕微鏡観察, 走査型電子顕微鏡観察, X線分析, EPMA測定などを行った。

その結果,溶融物中の析出相はムライトのみで加熱面にほぼ放射状に生成する,加熱面の近傍では $A\ell_2O_3$ 成分の多いムライトが,加熱面より隔たる領域では $A\ell_2O_3/SiO_2$ 比が略3/2のムライトが生成する 溶融球状粒子は中空球であるかもしれないと予想されたが,ほぶ数+ μ mの粒子より成る中実多結晶球体であることが徴細組織観察より明らかにされた。

2.6 溶融耐火物製造の経済性検討

2.6.1 まえがき

太陽炉は超高温が短時間に得られること、大気中で加熱,溶融が可能,汚染がない,などから,高融点耐火物の溶 融材料を製造するには最適であるといえる。これまで世界各国で多数の太陽炉が建設され高融点物質の高温挙動に ついて基礎研究が行われ多くの成果が得られている。特に名工試におけるこの分野の研究は世界的にも高く評価さ れている。

これまで本委員会は,高融点耐火材料につき太陽炉による溶融物のキャラクターを把握し,工業的生産の可能性 を検討することを目標として調査研究を行ったが,本年度は炉心部の構造として遠心回転空洞炉について,この空 洞炉で溶融したものの微構造,組織を検討して耐火物としての評価を行った。

この調査研究結果は |) 短時間に融点に達するため微細構造が得られる。 ||) これら微細構造は二次製品(加熱) として特長のある構造体が得られる。 ||) 冷却速度のコントロール(炉心部構造の改善)によって任意の微構造体 が得られる。 |V) 高温で複合酸化物の微細な層状溶融体が得られる。 V) 小球状溶融物が得られる。

以上のような溶融物の特性が認められたが大容量の太陽炉による工業的生産を行う場合は炉心部の構造として連 続溶融操作が可能になること,それに伴う保全,作業環境の問題点があげられる。また工業的生産規模の場合,立 地問題を別としても,光学系設備に膨大な資金を必要とすることから現時点におけるエネルギー代替の可能性は望 みうすであるが,高融点材料の高温溶融によるキャラクターの利用の面からみると必ずしも遠い将来のものである とはいえないであろう。

これらのことから現時点で推論できる範囲で二,三の問題点をあげる。

2.6.2 太陽炉溶融耐火物と電融耐火物の品質の比較

これまで本委員会で採り上げた高融点酸化物単体として、MgO, $A\ell_2O_3$, ZrO_2 の太陽炉溶融物は、それぞれの性質によって特異な現象が認められた。即ちMgO は高温度で揮発が激しく いわゆるスモーク状のものが多量に発生し、それらはウイスカー状、立方または球状の単結晶からなっている。次に $A\ell_2O_3$ は反射率が高いため溶融の進行が遅いことが認められた。また ZrO_2 は熱伝導度が小さいために $A\ell_2O_3$ と同様な現象があることがみられる。

ただし,これら溶融物の結晶度あるいは結晶構造と組織の制御が容易となればアーク炉溶融物で得られない特長 あるキャラクターをもったものを溶融製造できることが推定される。

-35-

また現在ではこれら酸化物単体の溶融はアーク電気炉で行われており高純度のものを製造することも出来るが、 同時に不純物の偏析,混入によって収率は著しく低下する。これに対して,太陽炉溶融の場合は不純物の混入が皆 無であるから,高純度の収得率は著しく改善されるものと推定される。

次に多成分系の高融点酸化物として調査研究を行ったものの中で |) MgO-CaO系, ||) $MgO-A\ell_2O_3$ 系, ||) $MgO-Cr_2O_3$ 系, |V) $A\ell_2O_3-Cr_2O_3$ 系 V) ZrO_2-SiO_2 系, VI) $MgO-Cr_2O_3 - A\ell_2O_3$ 系の複合化合物や固溶体を生成した溶融物は、結晶構造内主組織が特異性を示すことが明らかになった。 特に組成間に連続固溶体を生成するような場合は再加熱による結晶生長,離溶による二次結晶の析出などに伴う組織の変化がみられ、これらを原料とした成型耐火物の特性が生れることが予想される。

以上のように太陽炉によって溶融した高融点酸化物は、さらに詳細な検討が必要であるが特異なキャラクターを見 出すことが出来るものと考えられるので、エネルギー転換問題をおくとしても、これからの技術開発の一部門として 注目される。

その一例としてMgO-クローム鉱溶融物の再加熱による結晶構造,組織の変化に関する調査結果を示すと次の通りである。

(i) 溶融前試料は、市販の海水マグネシアクリンカー及びクロム鉄鉱の7:3混合物であり、この混合物の化学 組成は表2.4の如くである。溶融物の外観は、図2.57 および2.58の如くであり、暗褐色乃至は褐色を呈し、 滑らかな光沢を有している。顕微鏡下では、図2.59の如くであり全般的には図2.59の如き粒状のベリクレー スが大部分を占め、部分的に図2.60のような樹枝状の結晶生長が見られる。

この溶融前と溶融後の試料の化学分析値は、表2.4 に示す如くであるが、溶融前に比べ溶融後は Cr_2O_3 が減少し、CaO が増えた結果となっている。CaO が増加した理由については判然としないが、 Cr_2O_3 が減少したのは主として高温下での蒸発によるものと推定される。ベリクレースはX線回折の結果、結晶格子定数が通常のベリクレースより小さく、表2.5 にデす値となっている。このベリクレースの格子定数が小さくなっているのは、加熱中にクロム鉄鉱に由来する $A\ell_2O_3$ 、 Cr_2O_3 等の三二酸化物がベリクレース中に拡散し、且つ冷却速度が早いために、これら三二酸化物がスピネルとして離溶し得ず、固溶体を形成していることに起因するものであろう。

	溶融物	溶融後
${ m S}$ i ${ m O}_2$	2.3 8	2.58
Fe ₂ O ₃	3.7 4	4.28
AL_2O_3	7.4 5	7.95
CaO	0.55	1.15
MgO	7 4.0 3	7 5.7 0
Cr ₂ O ₃	1 1.2 1	9.0 5
Total	9 9.3 6	1 0 0.7 1

表 2.4 溶融物の化学成分 (%)

-36-

表 2.5 溶融前後のPericlaseの格子定数及び半価巾の比較

	溶融前	溶融後	Pure 1)2) Periclase
格子定数	4.2 1 1	4.196	4.212±0.002
半価巾	0.214	0.228	

図 2.57 溶融物外観

図 2.58 溶融物断面

(Å)



図 2.59 反射顕微鏡写真

均質部(×110)

図 2.60 反射顕微鏡写真 Dendritic 部 (× 220) (HC Lエッチング)





表2.6 EPMAによるPericlase の分析値

	1	2	3	4
МgО	81.44	8 1.0 0	7 9.2 7	7 8.6 9
Fe 203	4.5 8	4.8 0	5.0 3	4.9 6
$A\ell_2O_3$	4.9 3	6.39	7.05	7.42
Cr ₂ O ₃	8.9 0	8.7 1	8.9 8	9.6 4
CaO	0.0 4	0.0 3	0.0 2	0.04
SiO ₂	0.1 6	0.16	0.16	0.29
Total	1 0 0.0 5	101.09	1 0 0.0 1	101.04

この溶融物を1.800 ℃に加熱し, 徐冷後, 顕微鏡観察をすると図2.61 の如く, ベリクレース結晶が著しく大 きく成長し, 結晶内にemulsion typeのスピネルが離溶析出し, 同時に粒間に珪酸塩が集積してくるのが認め られる。この溶融物中のベリクレースについて, EPMAを用いて分析した結果を表2.6に示す。この分析結果 によると溶融物中のベリクレースは, CaO, SiO₂を除いて, 溶融物のBulk Composition とまことによ く似た値を示している。このCaO, SiO₂ は図2.62, 2.63 に示す如くベリクレース粒間, 主として monticellite 組成のガラスとして分布していることがわかる。

この調査により溶融急冷したマグクロ質材料のベリクレース結晶の状態, 急冷後の Annealing によるベリクレース結晶の成長, 珪酸塩ガラス相の移動集積等, 極めて興味のある現象を把握することができた。

図 2.61 1,800 ℃加熱後試料の反射顕微鏡



(\times 110)

(%)



Ca-kα

図 2.63 各元素の分布

Si−kα



(jj) 太陽炉によるムライト溶融資料と電融ムライトとの比較

太陽炉溶融ムライト試料と電気炉溶融ムライト試料との比較を偏光顕微鏡で行った。

太陽炉溶融部分の結晶化部分はよく溶融したムライト結晶から成っている。これらの結晶形は電融ムライトと よく類似した柱状晶であるが大きさは小さい。大きさは溶融後の冷却条件で異なるものであり,太陽炉の場合は 電融ムライトより急冷されたためと思われる。以下に顕微鏡写真を示す。なお電融ムライトはTiO₂ を 2.6 % 含んでおり、多色性を示す。

顕微鏡写真(クロスニコル×40)



図 2.64 太陽炉溶融サンプル

(A)

図 2.65 電融ムライト

電融ムライトの化学分析値の1例

$S i O_2$	$A\ell_2O_3$	Fe_2O_3	$T i O_2$
1 9.6 3%	7 6.9 9	0.78	2.6 0

2.6.3 高融点材料のエネルギー量

酸化物の溶融はSiC, B₄Cなどのカーバイト合成に比較すると少量の電気量でよいが, 所要エネルギーを石油 量に換算すると次のようになる。

	普通品	高純度
MgO	680 L / t	1,600~2,000ℓ∕t
ZrO ₂ (安定化)	1,410 L/t	?
$A\ell_2O_3$	390ℓ⁄t(高純度)	
	970 ℓ/t(中級品)	

注) 平均推定値を示す

j) 大型太陽炉(1.000 kw 炉)による耐火物溶融炉の推定

		稼動日数	生產量/年
ZrO_2	10 t/日	×180日/年	1.800 t /年
$S i O_2$	50-60 t/ \exists	× ″	8.000 \sim 10.800 t
$A \ell_2 O_3$	$6 \sim 8 t / \square$	× ″	1.080 \sim 1.440 t
5油量			金額

ij) 消費石油量

 ZrO_2 1.410 $\ell/t \times 1.800 t/Y = 2538 k\ell/Y$

 $A\ell_2O_3$ 500 $\ell/t \times 1.200 t/Y = 600 k\ell/Y$

以上のような使用エネルギーから計算すると太陽炉による溶融の場合,石油価格が現在の6~7倍の価格に相当す るものと推定される。

従って現時点におけるエネルギー価格からは問題にならないが,溶融物の特性面から考えると,出来得れば早い 時期に大型炉による工業化研究が必要であるといえる。

2.7 無重力場における太陽炉の利用

2.7.1 まえがき

地上における太陽炉の利用については本報告書を始め、多くの研究論文が発表されているが、宇宙空間あるいは 無重力場における利用に関しては殆んど見当らない。太陽エネルギー利用機器として、かつ高温発生装置として無 重力空間における太陽炉の利用は非常に興味のある問題であり、既に、結晶水を含んだ岩石の焙焼による水の製造 や高温材料の熱処理に関する太陽炉の利用に関する提案がなされている。

最近Space Lab ならびにSky Lab 等に関する調査が活発に進められつつあり、無重力場における高温熱 源としての太陽炉利用の可能性と、その用途を模索する目的でここでは無重力場における高温材料の熱処理に関す る最近の情報を調査した。

2.7.2 無重力場における高温材料の挙動

(1) 宇宙空間における材料研究の現状

宇宙空間での材料開発の研究は1966 年から1967 年にかけてMSFC(Marshall Space Flight Center) でとりあげられたことに始まる。しかし、宇宙航空分野を除くと、この開発研究から得られる成果 は現実の地上での材料開発の問題とかけはなれたものであると判断され、一時中断された形となった。数年を経

て、工業界からの関心も高まり、1969 年にはNASAのほかにOMSFとOARTの支援を得て、宇宙空間 を利用する材料製造の開発研究が進められることになった。当時溶接に限定された研究課題は拡がりを示し、

STR(Supporting Research and Technology)計画が設定された。これらの動向は宇宙空間が予想以上の豊かな研究開発の土壤であり、基礎的にもまた技術応用の立場からも現実の要望に既応する情報を提供する分野であることが明らかになったことを反映したものである。

1974 年には66の研究項目が取り挙げられ,推進されている。整理すると、1)金属;合金析出における 無重力の影響,共晶構造の複合材料製造における無重力の応用,過冷却問題,超高真空による高融点金属の精製 等,2)電子材料;気相輸送法による半導体結晶の育成,Bridgman法,Czochralski 法,浮遊帯法によ る溶融物からの結晶の育成等。3)生化学;電気泳動による分離技術の問題,生体材料の精製等 4)セラミッ クス;容器を用いない新種ガラスの製造,無重力を利用するセラミックの製造,加工等,5)流体の物理的性質 ;無重力状態における対流と温度差の影響-実際の宇宙空間飛行状態における変化等,6)化学;無重力を利用 した重合反応と重合物の構造規則性,電気泳動による非生物物質の分離精製等である。このように宇宙空間の飛 行と関連する問題に加えて多岐に亘る研究が進められている。

宇宙空間を利用する製造研究ではとくに物質をある特定の位置に浮揚させ、制御しながら操作することが可能 である点に特徴がある。すなわち容器を使用しなくて済む。さらには物質輸送や位置固定に電磁場を活用するこ とが可能である。気体であれば音波で制御することができる。地上での研究によると、1.000 ℃まででは三軸 の制御により、空間位置の固定、回転、浮揚などが可能である。

宇宙空間での電気炉工学はMSFCに負う所大である。一連の宇宙飛行実施計画に沿ったもので、最近これは Skylabの多目的炉にと発展した。ASTP計画では動力が初期のものより30 %少なくて済むようになってお り、温度域は2.000 ℃まで使用できるよう改善されている。高真空に関しては計算上10⁻¹³~10⁻¹⁷Torr が排気速度を大きくすることで得られる筈であり、清浄な反応空間が準備できることになる。

宇宙空間を利用する製造計画はASTP(Apollo-Soyuz Test Project)の他にSpace Station Programme 並びにSpace Shuttle とSpace habを包含するSpace Transportation System (STS)がある。ここでは少くとも人間が5~6名は乗務して最低5年間運転に従事すると考えられている。 組み込まれる研究計画は従来の経験からさらに拡大され70項目に及ぶとされている。塔載装置は地上のものが そのまま使用できることは少なく、大巾な修正が必要となるかもしれない。1980年代に入れば、年間数百の 研究が参加することになるので、このためには宇宙飛行の頻度はさらに高くなるであろう。

NASAの宇宙空間を利用する研究計画は宇宙工学に直接利用されるものばかりでなく,地上の工学,工業へ と広く還元され,将来の科学の進展に寄与する内容を広く含んでいる。

(2) 宇宙空間におけるセラミックスの製造

セラミックスの分野で宇宙空間を利用する利点は重無力状態,真空状態,放射線を利用できることにある。勿 論無重力が最も有力な要因を提供する。したがって温度差があっても溶融物は変形せず,融体内では重さに差が ないので対流が無視でき,均質性が維持できる。組成の変化を制御することができるので,複合材料の作成が容 易となる。凝固時には固液界面での潜熱の放出による融体の流動がないので,エピタキシャルに凝固する時間も 短かく,欠陥のない単結晶が析出する。さらに科学的には液相の拡散等が重要な課題となる。重力が無いので材 料の製造,加工,溶融には容器を必要とせず,このため容器からの不純物の混入が避けられる。器壁がないので 融体からの結晶核の発生は異なってくる。結晶は最低エネルギー面を見出して析出する。ガラスには気泡, Stone 等が閉じ込められるかもしれない。高温処理では容器が最高温度を左右することが多いが、この問題は 宇宙空間では容易に解決され、物質固有の性質を発揮することが可能となる。材料の保持が単純な機構ですむの で、高温被覆等の方法も制限が少なくなり、成形も地上で行うより、複雑な形状のものが容易に達成されるであ ろう。重力による変形がないので、問題は表面張力に絞られる。したがって、成形、加工には粘性の変化が少な い温度域を利用すれがよく、表面硬化などはこの原理を活用すればよい、今一つ融体の濡れが問題になることが あるが、重力の影響がないので濡れにくくなる。したがって固体表面としては清浄な原子面が得やすくなる。

セラミックスの或る種の工程では宇宙空間の真空を利用することが重要な利点となる。排気速度を大きくする と、大量の原料粉体の吸着物質を除去することが可能となり、これを用いて圧粉体とし、焼結させるわけである。 また、反応生成物として気相を形成する反応にも応用することができる。

宇宙空間には太陽光線等の放射線があり、他方セラミックスの製造には多量の熱エネルギーを必要とするので これら放射線を熱エネルギーに換えることにより問題は解決されるかもしれない。コレクターの平方m当り135 kwの熱エネルギーが得られる筈である。それ故、適当な規模の集光器が設置できると、Spacelab で所要の 熱エネルギーが得られることになり、Spacelab の性能は一段と向上する。しかし、このためには集光器が厳 密に制御された状態で運転されなければならない。

宇宙空間の研究成果から予測される今後の進展を整理すると次のようである。

1) 新製品の開発,製品の改良;この分野には光学用素子,レーザーガラス,欠陥のない単結晶,泥漿鋳込, 特殊な多結晶材料,一方向凝固複合材料,

2) 地上での工程の改良;工程の基礎現象を宇宙空間での研究成果より一層理解を深めることで工程の改良を はかることにある。溶融工程での気泡や欠陥,包含物の制御,耐火物との反応,イオン交換工程の制御,施釉 工程,セラミックコーテイング技術の発展等である。

3) 基礎現象の理解;熱拡散,清浄な原子面(分子面),弱い応力場の本質的理解等,

4) 放射線の有効利用;太陽炉による熱エネルギーの活用,

(3) Skylabにおける研究

1973 ~ 174年にSkylabで行われた材料の製造と直接関連する幾つかの研究を以下に挙げる。

1) 金属; Skylabに材料研究用装置が装荷されて8種の研究計画が遂行された。溶融, 熔接, 球体製造, 非 混合系合金組成, 核分裂性同位元素をトレーサーとする拡散, ホイスカー強化複合材料, 銀の溶融, 銅ーアル ミニウム共晶系である。これらは多目的電気炉において行われた。

2) 銀の溶融;無重力状態における溶融,固化による多孔材料の製造に関するものである。気孔の移動は地上 におけるより抑制され,ことに閉気孔を利用し,拡散速度の遅い気相を用いることにより気孔を閉じ込めるこ とができる。溶融時に球形であっても固化することにより,球形は変形する。

3) 電子材料としての単結晶;光学用,電磁気用材料として,LiNbO₃,Ba₂NaNb₅O₁₅,Bi₁₂GeO₂₀ BiTi₃O₁₂などがBridgman 法,Czochralski 法,浮遊帯法,溶融-気相法により検討され,後者の の二方法が,均質性,結晶の完全性,表面の完全性に優れた大形単結晶の育成に優れた方法であることが明ら かにされた。

4) 半導体とハロゲン化アルカリ;Ga,Ge-Se,Ge-Te,In-Sb,Ga-In-Sb,NaCl-NaF 等につき 検討されたが、とくに気相輸送法によるGeSeの単結晶が地上におけるより欠陥の少ない、優れた結晶である ことが示された。 5) CO₂レーザーを用いる酸化物結晶の育成; CO₂レーザーはエネルギー損失が少なく, 熱エネルギーを局所 に集中できるので, 溶融域を厳密に制御するのに有効である。温度は 0.1 %以内に制御することができる。不 純物の混入はなし, 大形の結晶が育成できる。

6) 超音波による空間での位置の固定と攪拌;溶融物を対象に空間のある位置に固定しさらに攪拌回転することが理論的に検討され 20KHzを用いる実験により確認された。

7) 流体における物理的,化学的性質;熱の対流は抑制できるが,完全に無視することはできない,流動速度の遅い条件を正確に評価することが重要である。化学反応は物質移動を伴うので,重力は反応速度に影響する。 慣性飛行の状態で求心加速度は10⁻⁵ G以下に抑制される。詳細は今後の研究に待たねばならない。

(4) 宇宙空間における今後の材料開発研究計画

Skylabで実験する時点ではほぼ無重力と考えられるが、その中間では約30 Gに耐えなくてはならないので、 塔載装置が制限され、実験内容も限定される。Spacelab になると最大3G位に緩和され、こればSpace Shuttle に塔載されるので実験設備も大型化され、処理量の増大をはかることもできる。これが一応1980~ 1990 年代に実現すると考えられている。この時期には研究成果の蓄積もあるであろうから、この中から地上 での工業に直接運営がはかられるものが産まれてくるかもしれない。一方、宇宙空間では直径3マイルのSpace Panel が打ち上げられ、太陽エネルギーを電力に変換して地上へマイクロウエーブで送られてくるかもしれな い。これらが計画されているという。

宇宙での研究推進に地上でも模擬研究が進められてきたし、また現在進められつつある。すなわち、長時間に 亘る無重力を必要としない研究では、投下塔、投下カプセル、航空機等を活用して10⁻²~10⁻⁴ Gの状態を得 ることができる。米国、仏国等で採用されており、このような基礎研究の積み重ねは近い将来に成果が期待され る。

以上の記述は次の論文によるところが大きい。記して感謝する次第である。

ESRO Sp-101, Proceedings of a Symposium held at Frascati, Italy .25 27, March (1974)

2) 斉藤, セラミックス 11(12) 1067 (1976)

3) 高橋, 真空理工ジャーナル 5 (3) 14 (1976)

4) 太陽炉における高温材料の問題点

2.7.3 太陽炉の利用

無重力場における高温発生技術としては地上のそれに対比して発生装置の重量,容積を始めとして高温熱源の設計 製作ならびに輸送,運転等に非常な制約が加わる。したがって電力の高温熱変換や化石燃料を始め水素・酸素燃料 等の使用は短期的に可能であっても輸送を始めとして困難な問題が多い。この点で,軽量セグメント方式の太陽炉 を折り畳み式で打ち上げて,宇宙空間で組み立て直接型太陽炉として太陽追尾を行えば3000K以上の高温は容易 に得られ,かつ地上のように雲等による天候の因子の影響を受けず,軌道上の衛星が地球の影の部分に在る間のみ 使用の制限を受けるだけとなる。この問題も衛星の軌道を考慮すればSSPS計画のように昼夜の断続性を避けて 非常に長期にわたり,常時使用も可能になる等多くの利点があげられる。既にセグメント方式太陽炉の打ち上げは 早くから米国で検討されていると伝えられ,これの追尾方式の研究も行われているようである。

-43-

2.7.4 まとめ

以上無重力場における高温材料の挙動と、最近話題となっているSpace LabおよびSky Lab 実験計画の概要について触れ、その高温熱源としての太陽炉の利用の可能性ならびにその寄与しうる部分について概説を試みた。 地上の環境と異なる宇宙空間における太陽炉の光学系の利用は、他の高温発生手段と異なり、殆んど制約を受けず、 かつ長期間にわたり安定した高温領域における熱源として非常に有効であると考えられ、今後この分野においても 適切な機器コンボーネント並びにシステムの開発が必要となろう。さらにこの方向への努力は高精度かつ安価な放物面反射鏡の開発へも結びつくものであることを付記したい。

2.8 結 言

第1小委員会の(昭和51年度調査研究としては j)太陽炉々心部構造として遠心回転空洞炉による A ℓ_2O_3 / SiO₂ = 3 / 2, Zircon Sand の二種類の溶融物のキャラクターを把握する j) 無重力場における太陽炉の利用探索という 2 つのテーマについて実施した。

i) については前年度の研究と併せていくつかの特徴を見出すことができたが,経済性(工業化)については十分な 評価データを得ることは困難であり時期尚早と考えられた。

ii) についてはセラミックスとして無重力,真空状態,熱エネルギーとして太陽炉の組合せにより,均一溶体,焼結 無欠陥単結晶,半導体などの研究として非常に有望であることがわかった。

3 シリコンの生産プロセス

3.1 緒 言

太陽電池の中で主力を占めるシリコン電池の素子材料のシリコンは、資源的にみて地球上に豊富に存在する珪石よ り製出されることは周知の通りである。然るに珪石の還元と粗製シリコンより高純度シリコン、さらに単結晶、ウ エハーへと進むプロセスの中で、大量の熱エネルギーと電力を消費する点と最終的な収率の低いこと等から、太陽エ ネルギーを利用したシリコンの生産の可能性を追求する試みが本第2小委員会の目的である。

前年度においては珪石の太陽炉による還元より始めてシリコン単結晶生長の5段階に分けて調査研究を行った。本 年度はSi太陽電池の実用化のための諸条件を原料シリコン生産の立場より検討し、さらに次の5段階のステップ の中、第1ステップと第4ステップを中心にさらに詳細な分析を行うと共に、原料シリコン電池のコストダウンにお よぼす影響についても考察を行った。なお第2〜第3ステップの検討は前年度に終了しており、第5ステップについ ては間欠的な太陽エネルギー資源のみでは温度の精密な制御が困難であることから補助エネルギー源と太陽炉の組み 合わせによる前年度の提言に止めた。

第1ステップ : 珪石より粗シリコンの製造

第2ステップ : 粗シリコンと塩酸よりSiHCl₃の生産

第 3 ステップ : SiHC 1₃の精製

第4ステップ : SiHCl,の熱分解による高純度シリコンの生産

第5ステップ : シリコン単結晶の成長

3.2 第2小委員会の活動経過

昭和 51 年度の第 2 小委員会の研究調査の目標は、太陽エネルギーによる「シリコンの生産」の課題の中で特に前 年度に検討の終了していない原料珪石よりシリコン製出の過程を取りあつかう第一ステップと、トリクロロシランよ り多結晶シリコンの析出に関する第四ステップの検討に重点を置くこととし、さらに太陽電池用原料シリコン生産の 経済性についても検討を加えることとした。

3.2.1 第8回第2小委員会(昭和51年6月16日)

i)当年度が過去3ヶ年間の総まとめになることを考慮して各ステップについて検討を加えた。なお小林主査が
 昨年末他界のため本小委員会主査は野口専門委員会主査が兼任することとした。

ii)第1ステップは本小委員会の研究調査の対称の中で最も基本的なプロセスであることから分科会を編成して
 中西,水野両委員を中心に検討を加えることとした。

(iii) 第2および第3ステップは相賀委員により前年度ほぼ検討が終了しており,残る問題としては低温蓄熱が挙 げられ、蓄熱サブシステムを欠いた場合の製出ンリコンの品質が太陽電池に利用可能な程度に良好か否かの討議 を行った。

Ⅳ)第4ステップについては相賀、水野両委員を中心にトリクロロンランの太陽炉による熱分解の検討を実施する。

V)第5ステップはシリコン単結晶育成において蓄熱,温度制御等技術的に非常な困難な問題をかかえており、 昨年度一応検討したが、関,見目両委員を中心に検討の方向を考慮することとした。 3.2.2 第9回第2小委員会 (昭和51年10月1日)

各ステップについての調査の進行状況の報告を中心に討議した。

j) 第1ステップは5月19日,7月23日,8月27日の3回にわたり分科会を開き,SiO₂に対して10~
 2.0 Cの配合組成においてSiO₂+1.5 C 以下ではSi が,SiO₂+1.75 C以上ではSi とSiC が生成することが認められたことを報告した。なおSi の分析方法の検討の必要性が提起された。

ii) 第4ステップの反応容器の構想が報告された。

iii) 太陽電池用シリコンの純度の問題について、太陽光発電専門委員会と連絡を取ることを打ち合わせた。

 $|V\rangle$ 第 1 ステップの Si の確認について, Si を Si₃N₄ として定量する方法と Si 酸性ゲル化法について検討 することとした。

3.2.3 第10回第2小委員会 (昭和51年11月12日)

j) 第1ステップならびに第4ステップの反応容器の概念設計は終了した。

ij) Siの分析に関しSi酸性ゲル化法は難しいと考えられるのでこの検討は中止した。

iii) 報告書の作成の分担について

Ⅳ)東洋シリコン(株よりシリコン原料問題に関する文献を入手,相賀委員と新たに信越半導体(株より横田幹夫氏を委員として迎え,両氏に検討を依頼した。

- 3.2.4 第11回第2小委員会 (昭和52年2月3日)
 - i) 昭和51年度の報告書の作成状況の打ち合せを行った。
 - i) Si の分析に関し,水野,中村両委員に依頼した。
 - iii) 第4ステップの報告書は横田,水野両委員による。
 - jv) 原料シリコンの経済性検討を横田委員担当とする。
- 3.2.5 第2小委員会分科会の活動経過
- (1) 第6回分科会 (昭和51年5月19日)

i) 第1ステップの反応生成物のX線解析ならびに螢光X線解析結果について討議した。

SiO₂+1~2Cの組成について検討の必要を認めた。

iii)反応中のアルゴン圧の検討を要することが提案された。

- (2) 第7回分科会 (昭和51年7月23日)
 - j) SiO₂ + X C においてSi の生成するのは X = 1.5 が望ましいと報告された。

ii) 太陽炉により照射加熱を行う反応容器で,器壁内面に蒸発物の付着する現象を防止する方法について検討 することを提案した。

- (3) 第8回分科会 (昭和51年8月27日)
 - j) 反応容器の太陽炉による照射加熱方法,アルゴンガス流入と流量測定等について討議した。
 - ii) 反応容器の入射壁を2重壁とすることについて相賀委員より提案され採用することとした。
 - iii) 相賀委員は8月末で辞任し、信越半導体㈱の横田氏が後任として決定された。
- (4) 第 9 回分科会 (昭和 5 1 年 1 2 月 2 2 日)
 - () 報告書作成について担当執筆者を決めた。
 - ii) Siの分析および確認について中村委員に原稿を依頼した。
 - iji) Siの生成量についてX線分析ならびに化学分析結果より約20%と推定されることが報告された。これ

は試料の量が少ないため精度が不十分であり,また分析操作までに一部酸化されて低い値となったものと考え られることが報告された。

3.3 Si 太陽電池実用化のための諸条件の考案

3.3.1 まえがき

年々巨大化するエネルギー消費量の増大に伴って有限な化石エネルギー源の枯渇が危惧され無限な代替エネルギ ー源の探究が待望されている。こうして核融合エネルギーの実用化と並んで太陽エネルギーの有効利用が期待され その重要な手段として,Si太陽電池の実用化が考えられている。確かにSi太陽電池は既に宇宙旅行体では唯一 の半永久的エネルギー源として実用化されており、"地上での実用化も容易ではないか"との期待もかけられてい る。

そこで本稿では、この期待に沿って、Si 太陽電池の実用化のための諸条件の考察を行ってみた。先づ現状の技術での実用化の可能性を原料供給面とエネルギー回収率の両面から検討しその可能性は現在技術の単なる延長線上に無いことをはっきりさせたい。次いで現在進められつつある将来技術が完成した場合についての検討を行い、実用化の予測をしてみたい。また最後に米国におけるSi 太陽電池実用研究プロジェクトの概要を簡単に紹介したい。 3.3.2 原料供給能力からの考察

(1) 限定条件

通常エネルギー代替用に既に実用化されている宇宙船用Si太陽電池の使用を考えると,高純度Siの使用 量は膨大なものとなり,現在プロセスの拡大だけでの実用化の難かしさは,容易に想像されるところである。しか し、ここに敢えてその計算を行いその困難さを確かめてみよう。

今,仮にその用途を一般家庭電力だけに限定したとして必要なSiの量はどの程度のものとなるのだろうか。 又その必要量は現在の原料供給能力と比較して、どの様なものになるであろうか先ず検討して見る。

試算のモデルとしては標準家庭における全エネルギーの消費量をベースにした。すなわち先ず、4人家族の標準家庭を考えそこで使われている電力,石油,ガス等全てのエネルギーをSi太陽電池に置き換えた場合を想定し試算を進める。

統計によれば我が国の場合,55年度における家庭用電力の消費量は合計約1.400億KWH と想定されている これを上記標準家庭を考えて平均化すれば,一戸,一ケ月あたり約470KWH となる。

実際にはこの他に石油やガス等のエネルギーを消費しているわけであるが、それを電力に換算して見ると合計 値は約2倍近くにはね上がる。以下の試算ではこの様な条件に一つのベースを置き、次の様なモデルを考えて検 討を進めてみたい。

(2) 概略試算

所要Si量の推定

- ① 家庭用電力平均 : 4 kWH/戸 ② 日内平均使用時間 : 8 Hr/D
- ③ 日内使用電力量 : 32kWH/戸・D (1ケ月では960kWH/戸)
- ④ 太陽電池(以下S.Ceと略称)平均稼動率 0.50×0.50=0.25

日照率晴天率

⑤ S Ce所要出力:
$$X_1 = \frac{3}{24 \text{Hr}/\text{D} \times 0.25} = \frac{32 \text{kWH}/\text{P} \cdot \text{D}}{24 \text{Hr}/\text{D} \times 0.25} = 5.3 \text{kW}/\text{P}$$

ii) 国内年間シリコン消費量をS.Ce 用に廻した時の対象戸数

⑭ シリコン年間国内消費量 : 50000 t / Y

15 現状方式での原単位とSi 生産量

金属シリコン →	トリクロ ロシラン	~->	多結晶シリコン	\rightarrow	単結晶シリコン
1.00 t			0.17 t		0.085 t
50000 t / y			8500 t⁄y		4250 t 🖊 y

● 金属シリコン1年分で作れる戸数

$$X_{4} = \frac{(5)}{(3)} = \frac{4.25 \times 10^{6} \text{ kg/y}}{1.234 \times 10^{2} \text{ kg/F}} = 34.440 \text{ F/y}$$

iii) 国内全家庭分をまかなうとした時の所要年数

⑦ 全家庭数 約2.500万戸

18 S Ce 生產所要年数

$$X_5 = \frac{1}{6} = \frac{2,500 \ \text{JP}}{3.444 \ \text{JP}/\text{y}} = 727 \ \text{y}$$

jy) 新単結晶技術を用いた場合

金属シリコンから単結晶Si までの歩留が仮に10 倍に上がったとしても

⑩ ' 金属シリコン1年分で作れる戸 X4'=344.440 戸/y

⑧ 'S.Ce 生產所要年数 X₅' = 72.7 y

(3) 原料供給面からの結論

その用途を単に、一般家庭用電力だけに限定するとしても太陽電池の生産に要するSi単結晶の量は膨大なものとなる。上の計算によれば全戸数分をまかなうとして123.4 kg/戸×2.500万戸=3085万t の多くに達する。これを又、見方を変えて示し上例の如く国内で消費されている金属ンリコン(MG-Si)の全てを太陽電池用Si(SG-Si)にふりむけるとして見よう。その場合には全戸数分の太陽電池を生産するのに、実に約730年を要するという結果となり今のままでは現実的とは言い難い。

エネルギー需要面では家庭用電力は勿論その僅か一部に過ぎない。電力だけでも同じ55年度の予想値として その約4.2倍に当たる産業用及び業務用電力の需要が見込まれている²⁾ 一方エネルギー源としては、電力の他 に、石炭、石油、天然ガス、その他多くの種類がある事は前述した。最近の統計によればエネルギー源だけとし て比較した時、電力とその他のものの合計の比は1:1を越えている。これらの全てを対象に考えれば、結局太 陽電池には家庭用電力エネルギーの10倍に近い需要があり、それだけ所要年数も増大するという結果を招くこ とになる。

逆にその原料となる金属シリコンの用途は一般デバイス用Siへの充当分も含め、金属シリコン本来の用途の あることも忘れてはならない。これらの事を総合して考えねば、太陽電池によるエネルギーの代替ということは この原料供給面からだけでも容易なものではないということに気付こう。

太陽電池実用化には,この意味から需用面と生産面の双方から慎重な配慮を要することが知れる。このうち生 産面からは単に単結晶工程の改革だけにとどまらず,前段階としての金属ンリコン→多結晶工程,及び後段階た る加工工程等,全ての分野に新しい改革の目を向ける必要のあることが知れる。

3.3.3 エネルギー回収率からの考察

(1) 目 的

Si 太陽電池実用化へのもう一つの障壁としてエネルギー回収率からの不利がよく挙げられる。即ち太陽電池 そのものの発生するエネルギーに比し、材料Si を生産するに要するエネルギーの方が極端に大きく、問題にな らないという議論である。

そこで,次にこの面からも簡単な考察を加えて見よう。本稿では先づ現状法をベースにした試算を行い,次い で最近の公表資料に基づき将来システムへの想定をも試みて見た。

(2) 現状法に基づくエネルギーバランス概略試算

i)太陽電池用Si 製造での消費エネルギー

金属シリコン→トリクロロシラン→多結晶シリコンを通る現行の方法によれば多結晶Silt当りに要する 消費エネルギーは、約50万KWH と計算される。これを単結晶とし、次いでウエハー加工の工程を経てポリ ッシュウエハー(PW)に変えたとすれば、その値は更に増大しPWベースで約220万KWH/t の値が得 られる。但し、今回の試算ではウエハー厚み 300 μ m、切断ロス300 μ m を標準とした。

太陽電池の場合,地上用と宇宙用では,原単位の面でもかなり差があるとされているが,ここでは飽く迄地 上用一本で考える。その場合 PWから Cellへの歩留を60%とし,更に加工用電力を入れて試算すると 太陽電池用Silt当り約380万KWHという値が得られる。

以後の計算のためにこれを単位面積当りに換算する。ウエハーの厚み360μmをベースに計算すると、その 換算系数は0.7 kg/ ㎡となって、これより1 ㎡のSi セルを作るに要するエネルギーは

3800 KWH / kg × 0.70 kg / m^2 = 2,660 KWH / m^2 なる結果が得られる。

ii) 太陽電池としての発生エネルギー

一般に太陽電池の出力は平均変換効率を10%とすれば0.10kW/ ㎡と言われている。

年間平均日照率を50%,平均の晴天率を50%とすれば、太陽電池としての年間平均稼動率は、前述の如く25%となる。(④項参照)

従って、その出力は年間を通じ

0.10 KW/m² × 8,760 H/Y × 0.25 = 219 KWH/m²・Y となる。

iii) 消費エネルギーと発生エネルギーの対比 …… エネルギー回収時間 Tre今両者の対比の一つの目安として

エネルギー回収時間 Tre = $\frac{S \cdot Ce \ \exists S \cdot Ce}{S \cdot Ce \ b \cup Co \in B$ 発生電力量 なるファクターを定義すると

今回の例では Tre = $\frac{2.660 \text{ KWH}/\text{m}}{219 \text{ KWH}/\text{m}\cdot Y}$ = 12.15 Y なる結果が得られる。

太陽電池実用化への一つの条件は、ここで定義されたTre 即ちエネルギー回収時間が太陽電池としての最 大稼動時間(運転寿命)Teより短い事と考えられる。

現在迄の所, Te は一般に10年と見られているのでその意味からすれば,上の条件を満足せず,エネルギー回収率の上からも,まだ,実用化の域に来ていないと結論づけられよう。

太陽電池としての優位性を確保するには、只 Tre = Te ($\therefore \frac{\text{Tre}}{\text{Te}} = 1.0$) 程度の条件では満足とは言えず実際には $\frac{\text{Tre}}{\text{Te}} < 1.0$ なる線が目標とされている。

3.3.4 将来システムにおけるエネルギー回収率改善指向

(1) 単結晶工程改善への一例

従来最も広く且つ深く研究されているのは、この工程であって、その実例も極めて多い。その中からDow Corning 社及びPennsylvania 大学グループで検討を進めているCz 拡大法を、先づ採り上げて見よう。

この方法での諸データーは表3.1 に示したが、その27 項によれば、消費エネルギーは約20 KWH/kgSi とされている。(2)項における試算では、この工程でのエネルギーを約200 KWH/kgSi として計算しているの で、このCZ拡大案が実現したとすれば、少なくともこの工程では消費エネルギーが 10 に減少する。他の工 程に全く差なくしても、これは全消費エネルギーとして20 %減少した事に相当し、その影響は大きい。

すなわち, Tre でも20 %少なくなって,約10年となりTeとほぼ等しくなることを意味している。

次に良く知られているEFG法を掲げてみたい。EFG法に関する報告は極めて多いが、その原単位構成に触れたものは余り見当らない。そこで本稿では第9回IEEE資料より、その推定を試みた。

その結果によれば、EFG工程だけでの消費電力は約23 KWH/kg となって、CΖ拡大法をやや上廻っている。EFG法の特徴は、しかし、ウエハー加工工程でのロスが激減するところにありとされているので、エネル ギー消費の面でも、当然その反映が期待される。

(2)項の試算では、この工程でのロスを50 %と見たが、そのうち80 %がEFG法では救われると見ると全消費エネルギーも、それを反映し、結果的に約50 %近く減少することになる。

すなわち、EFG法では、Tre も約半分の6年となり $\frac{Tre}{Te}$ も0.6の線まで落ち、実用域に近づく事が予想される。この辺がEFG法に対する当面の期待と言えよう。

(2) 多結晶工程からの改善効果

Cz 拡大法で見た如く、単結晶工程だけでは、その改善効果には限界がある。抜本的な改善には、多結晶部門 も含めた全工程対策への期待が大きい。

前記の如く、Dow Corning 社、その他のグループによって、トリクロロシランの過程を省略した多結晶プロセス、即ち金属シリコンのグレードアップによる太陽電池グレードSiの直接製造プロセスの研究が続けられている。今回のエネルギー計算にあって、多結晶生産用エネルギーの大半が、このトリクロロシラン→多結晶Si析出の工程に集中しているため、その省略が計られれば、全消費エネルギーも桁違いに良くなる事は、容易に想像出来る所である。そして、その完成によって、初めて実用化への条件 $\frac{\text{Tre}}{\text{Te}}$ <1.0 が満たされることにもなろうし、又コスト面でもERDA等の目標とする線が実現することになろう。

項目		解析結果			
大項目	Мо.	名 称	単位	収率 50 %の場合	収率80%の場合
	1	単結晶直径	ст	20	2 0
休日止くべ	2	円筒部重量	k <i>g</i>	5 6.2	9 0.0
結晶ワイス	3	テーパー部重量		5.2	5.2
业のに重重	4	合 計 "	"	6 1.4	9 5.2
	5	残 湯 "	"	5 0.6	1 6.8
	6	チャージ量	"	1 1 2.0	1 1 2.0
	7	引上げ速度(長さ)	<i>c</i> m∕Hr	1 1.5	1 1.5
	8	〃 (重量)	kg∕Hr	8.4	8.4
	9	引上げ時間	mn	4 0 1	643
	10	熔 融 ″	11	150	150
	11	冷却"	11	3 0	3 0
運転時間	12	仕込み,取出し ″	"	6 0	6 0
	13	温度安定化 "	"	5	5
	14	4本引上げ後の清掃〃(100min)	"	2 5	2 5
	15	補修"	"	4 0	4 0
	16	合計サイクルタイム	mm(Hr)	711(11.9)	953(15.9)
	17	年間運転時間	Hr∕Y	8,000	8,000
	18	年間引上げ本数	本/Y	675	503
	19	引上げ成功本数(成功率)	"	540	402
運転データー	20	年間生産重量	kg∕Y	3 3,1 5 6	3 8,2 7 0
	21	設備余裕(= <u>総機械数</u>) 実稼動機数)		1.97	2.6 4
	2 2	所要工数	Mar-Hr サイクル	6.0	6.0
	23	機械1台当りの労務費	\$∕SetY	3 6,5 4 8	2 7,2 7 2
	24	熔融電力消費量	KWH	360	360
電力消費量	2 5	引上げ ″	"	1,029	1,6 5 0
	2 6	合 計 "	kWH/1引上	1,389	2,0.1 0
	2 7	単位重量当り合計 〃	kWH/kg Si	2 2.6 2	2 1.1 3

表3.1 大型プロセス解析推定結果一覧表

IJ	項目		解 析	結 果	
大項目	<i>N</i> 6.	名称	単位	50%	80%
	28	労務費	\$ / kg	1.10	0.71
	29	エネルギーコスト([@] 0.03 ^{\$} kWH)	"	0.68	0.63
	3 0	石英ルツボ費	"	0.4 9	0.3 1
	31	その他諸材料費	"	2.1 3	2.72
	32	設 備 費	"	2.8 4	2.2 6
コスト集計	33	直接費合計	"	8.2 4	6.63
	34	原料Si 費(高品位 MG-Si)	11	1.5 0	1.50
	35	回収原料費	%	4 5	15
	36	回収可能コスト	\$ / kg	0.4 5	0.1 5
	37	Net 原料費	"	1.0 5	1.3 5
	38	製造コスト合計	"	9.29	7.96
	39	コスト合計(製造コスト + 20%G&A)	"	1 1.1 4	9.5 5

備考 : 上記試算については次の諸条件を仮定

① 8 ″ ¢の引上げに可能性の目途のつく事

② Sikgあたりのエネルギー消費量は、インゴットダイヤの増大と共に減少すること。

③ 冷却水コストは無視出来るレベルにまで減ること。

④ アルゴンコストは真空引上げという事で零とすること。

⑤ ルツボコストは同レベルで残ること。

⑥ 諸材料費は設備費に比例すること。

⑦ 引上げ装置は4年周期で一償却すること。

最近の資料によれば、Energy Pay – back Time 即ち、ここでいうTre が従来法の12年から新方式 では12ヶ月にまで縮まり、更にウエハーの厚みを300 μ m から100 μ m に下げるとして、それは4ヶ月に まで下がるだろうと報告されている。³⁾

これは又先に問題とした原料供給能力から見ても抜本的な対策となり得るものとなろう。

3.3.5 太陽電池のコスト問題

実用化へのもう一つの条件はコストとされている。但し、この問題については、既に多くの報告があり、広く検討 されているので、本稿ではその要点のみを記述しておきたい。

アメリカにおけるERDA(米国エネルギー開発局)の開発計画にあっては、その中に低コスト太陽電池開発のサ ブテーマ(LSSAプロジェクト)が設けられているが、そこでの目標は1985~86年において

- ① 価格で 500 \$ / KW以下 ② 生産量 500 Mw / Y以上
- ③ 寿命 20年以上 ④ 変換効率 10%以上

という線に置かれている。

これに対して,現在宇宙開発その他に使かれているものでは125.000 \$√K₩と大きい。そこで現在

① 量拡大の効果 ② 新技術開発への期待 等を武器に、このコスト低減に焦点を合わせた研究が続けられて いるわけである。その観点に立ってCurrinらは将来システムへのコスト試算を試みている。⁴⁾

その結論によれば、量的に現状の1000倍を考えた時、先ず既存技術の延長では、1000 \$ / KWが限界という。これ に対し、多結晶工程に工夫を加え、EFG法等、新技術との結合を計れば、そのコストは250 \$ / KW の線に落ち着 いて初めてERDAの目標を満足できるとしている。

こうしてコストの面でもやはり新しい技術が強く嘱望されて来ることになる。

ERDAの一連の計画は、勿論こうした各面からの要請を反映して始められたものであるが、自らの特徴を活かし 乍ら極めて多くの機関や法人がこれに参加し、広い角度から、鋭意その開発研究が進められているわけである。

次にこうしたERDA計画の概要とその中での特記事項の一部に触れて見たい。

3.3.6 **ERDA**プロジェクトの概要

ERDAプロジェクトの構成を図 3.1 に示す

図 3.1 ERDA開発計画基本構成図



このうちSi 材料の開発を目的とするものは, Low Cost Silicon Array Project (LSSA)と呼ばれ図3.2の構成となっている。

図 3.2 LSSAプロジェクト構成図



ここでの目標とする所は前述の通りであるが、その目標達成へのタイムスケジュールとしては図 3.3の如き線 が考えられているという。



図 3.3 LSSAプロジェクト目標達成スケジュール

図3.2に見る如くLSSAは、5つのタスクに分かれ夫々のタスクには又幾つかの機関が契約を結び参加しているわけであるが、参考までにその契約機関を表3.2に示して置く。

3.3.7 太陽電池用新技術へのアプローチの一例

LSSAの中にDow Corning 社グループの担当する"金属シリコン改善法(Si From Pure Source Materials using Arc Furnace Processing)" も含まれているが,新技術へのアプローチ状況の一例 として本稿ではここにその内容の要点を述べて見たい。

(1) 方式の概要⁵⁾

図3.4はその基本的なプロセス構成と各部における研究テーマをまとめたものである。



図 3.4 MG-Si の品質向上策模式図

すなわち, このテーマの中には

j) アーク炉の改善 …… 原料選択,精製,構造材料及び運転条件の検討他

ii) スラッグへのガスブロー法 …… 塩素吹入法, S_i F₄ 循環法他

ⅲ) 単結晶化技術改善 …… 大規模 Cz 法他

等が含まれている。

これらの研究を通じて高純度Si 製造プロセスの中からトリクロロシランの過程を省略し,究極的には、

1 \$ / kgのMG-Si (メタルグレードSi)から10 \$ / kg以内のSG-Si (ソーラーセルグレードSi) を3000 t/Y のベースで作れる体制に持って行く事を狙いとしていると言う。

先づ j) 項については,原料問題が重要な役割を持っている。実際には SiO₂ 源及びカーボン 源の双方から 研究調査が進められているが,特に後者の品質選定や精製処理によって,重金属を中心とする金属シリコン中 の不純物の大巾な低減への可能性が報告されている。 ji) 項では,熔融したMG-Siの中へ反応性のガスを吹き込む事で特にBoron 等の不純物を除去する方法 が検討されている。この中には $C\ell_2$, O_2 , $HC\ell$, H_2O , H_2 , SF_6 等を反応ガスとして吹き込む実 験もあるが,特殊な方法としてSiF4循環法も検討されていた。

ここでの基本反応は Heat + Si(s) + SiF₄(g) \leftrightarrows 2 SiF₂(g) として表わされるが、この平衡が温度条件によって Si(s) + SiF₄(g) 1,150℃ 2 SiF₂(g) (a)

 $2 \operatorname{SiF}_{2}(\mathcal{G}) \quad 5 \quad 0 \quad 0 \quad \mathbb{C} \quad \operatorname{Si}(s) + \operatorname{SiF}_{4}(\mathcal{G}) \quad \cdots \quad (b)$

の形をとる事を利用しようとするものである。この反応サイクルを図3.5 に又プロセスフローシートを図3.6 に 示す。





図 3.6 SiF₄ 循環法フローシート



(a) プロセスフローシート

 $2 C + SiO_2 \rightarrow Si + 2 CO \sim 500\%$ Si + SiF₄ $\rightarrow 2SiF_2 = 2 SiF_2 \rightarrow Si + SiF_4$ Hg

SiF₄循環法は Future Process として注目されているものの一つであるが、ERDAプロジェクトの中 ではMotorola 社、その他のグループに引き継がれ、研究が進められている。 III)項の単結晶化技術は上記2ス テップの延長の上に立つものであるが、本グループとしては先づCz 技術の拡大応用という線に沿って検討を進め 大型プロセスを想定してのコスト解析結果を報告している。 7)

参考までにその結果を表3.1にまとめて示した。ここでは112 kgのチャージで8インチの単結晶を引き上げる 事を想定しているが、前記アーク炉改善法との結論によって結局トータルコストは 10**%**/kg内外となり、目標に ほぼ合った成果が得られると結論づけている。飽く迄これは仮定条件の組み立てで構成された結論であるが一つの 方向として今後への推移は注目に値するものと言えよう。

3.3.8 まとめ

エネルギー問題の将来を考える時、太陽電池への配慮は欠かせまい。しかし、その実用化という観点に立って見 る時には、尚越え難い幾つかの壁のある事も頷けよう。一方その壁の一つ一つに挑戦し何とかその打破を計ろうと する真剣な且つ着実な動きのある事も事実である。ERDAの目標が示す通り、その現実には尚10年近い日時を 要するものであろう。

これらの時間にあって自ら何が出来るかを良く判断しその結論に従って全体計画の中で、基礎的な事項からひと つづつ固めて行く地道な努力こそ我々にとっても今要求されている事であろう。

タスク	n - n h that	契 約	者並びに担当	当テーマ
No.	ダメダ名称	テーマ区分	契約 者	担当テーマ名称
		Semi Con -Gvade Production Processes	Battle MemorialInst. Motorla Union Carbide	Sifrom Si Cl_4 Si l_4 Si using SiF ₄ Transfer Si from Si H ₄
		Solar Cell — Grade Specifications	Monsanto Reseach	Investigation of Effects of Impurities on Solar Cell Performance
			Westinghouse Elec.	"
1 Silicon Material		Dow Corning	Si from Pure Source Materials using Arc Furnace Processing	
	Solar Cell —Grade	Texas Instruments	Si from C Reduction of SiO ₂ using Plasma Processing	
	Production	Stanford Research Inst•	Si by Duplex Vapor Electrochemical conversion of SiF_4	
		P rocesses	Westinghouse Elect.	Siby Plasma Arc Heater Reduction of $SiCl_4$ with H_2 and alkali Metals as Reducng Agents
			Avco Chem. Research Labs	Siby Use of a Non — equilibrium Plasma Jet
		Commercial Potential of Processes	Lamar University	Evaluate Relative Commercial potentials of Si - Production Processes developed under Task 1

表 3.2 ERDA LSSAプロジェクト契約者の一例

タスク	n an	契約	者並びに担当	テーマ
Мо.	タスク名称	テ - マ区分	契約 者	担当テーマ名称
		Ribon Growth processes	IBM Mobil Tyco Motoraea RCA Univ of So Carolina	EFG EFG Laser Zone Ribbon Growth Inverted Stepanov Growth Web — Dendritic Growth
2	Large Avea Silicon Sheet	Sheet Growth Processes	General Electric Honeywell	Floating Substrate (CVD on Liquid) Dip - Coating (On Low - cost Suertrates)
	-		Rockwell	CVD (on Low Cost Substrate)
		Ingot Growth	Crystal Systems	Heat Exchanger Ingot Casting and Multiple Wire Sawing
		Ingot Cutting	Varian Univ of Penn	Breadknife Sawing Hot - forming of Silicon
			Battle Memorial Institute De Bell and	Encapsulant Experience and Definition of Environment Polymeric Property
3	Encapsulation		Richardson Rockwell	Accelerated Abbreviated Testing
			Physics	Integral Glass Covers
			Motorola	Manufacturing Processes Assessment
4	Array Automated Assambly		RCA Texas Instrument Simulation	" " Electron — beam Solar Cell Fabrication
			Mitre Corporation Texas Instruments	Array Test Evaluation CZGrowth and wafering Improvement
	· · · ·		Solarex	Array Test Evaluation
5	Large		M7 International	Solar Array procurement 15kw
	Production		Spectrolab Solarex	" 10 " " 10 "

参考文献

1) 通産資料調査会刊 資源エネルギー年間(51.2) P575

2) 同 上

- 3) Lee P.Hunt, "Total Energy Use in the Production of Silicon Solar Cells from Raw Materials to Finished Product" Record of 12 th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, 76
- 4) C, G, Currin, K, S, Ling and others "Feasibility of Low Cost Silicon Solar Cells"
- 5) ERDA/SE/EC(11-1)-2721/PR/75-3

C.D.Graham and others(Univ, of Penn.) L.D.Crosman and others (Dow Corning Corp) "Research and Development of Low Cost Processes for Integrated Solar Arrays"

6) NSF/RANN/SE/GI-29729×/PR/74-2

V . Kapur (Univ of Pennsylvania) L P.Hunt (Dow Corning Corp) and others

"Research and Development of Low Cost Processes for Integrated Solar Arrays"

7) 文献 3) に同じ

3.4 第1ステップ(粗シリコンの製造について)

3.4.1 まえがき

前年度第2小委員会としては、太陽電池向けンリコンの製造について、特に第1ステップである珪石と炭材 から金属けい素をつくることが最も難かしいとの判断のもとにフエロアロイ協会の協力により日本電工、中村委員 日本重化、福津委員、昭和電工、山田委員の参加を得て分科会を設置し延べ5回にわたる検討を行った。その結果 電気炉法による金属けい素の製造と太陽炉によるそれの比較検討が重要である。 珪石と炭材とを直接反応させ 金属けい素を生成することは昭和50年度報告書に報告した。今年度はこれをさらに詳細に検討すべく5回にわた る委員会活動の結果反応装置及び製造方法に関して或る程度の結論を得た。

これらの内容については項をあらためて記述する。

3.4.2 第1ステップの経過

第1ステップの調査研究の経過の中で昨年の報告書においては微粉末にした珪石と炭材(一部炭化けい素)を用 いて SiO₂ +XC→Si +CO なる反応を想定し SiO₂に対してC量をそれぞれSiO+C, SiO+2C及 びSiO+SiCの組成とした。 $6 \times 6 \times 30$ %角柱をアルゴン雰囲気熔融法により照射したところ直ちに反応が進行 し次のような結果が得られた。すなわち

(1) C量即ちSiO₂+C, SiO +C, SiO +2Cでいずれも装置内蒸着物にはSi, SiC の生成が認められ、SiO₂+CではSi, SiO+2CではSiC が主体であること、さらにSiO +SiC が主体になっている。

(2) 蒸着物はX線解析でSi,SiC の確認はされたが試料が少ないため分析するまでに至っていない。

(3) 蒸着物を多量採取したくても反応が激しく装置内での蒸着が急速に進み太陽照射のじゃまになり継続照射が 困難である。

以上の3項目について問題点の解決を中心に51年度は検討を進めた。

3.4.3 第1ステップにおける太陽炉の利用

昭和50年度において,珪石より粗製シリコンを生成する工程の検討を行った結果.アルゴン雰囲気中で太陽エネルギーを照射加熱することによりシリコンの生成が認められることが判明した。。表33ならびに図37

これらの生成物を検討した結果、シリコン生成の効率と経済性を考慮してSiO₂+C組成につき炭素材(木炭)の量をX=1から2C間に変化させたものの溶融反応につき検討を加えた。

<u></u> 植 成	蒸 発 物 [*]	溶融試料
1) $SiO_2 + C$	S i	Si + SiC + SiO?
2) SiO ₂ + C	Si + SiC	S i + S i C + "
SiO ₂ + 2 C	SiC+ Si	S i C + "
S i O ₂ + S i C	S i	S i + S i C + "

表3.3 各組成のX線回折結果

*反応容器に付着した試料

調査に用いた試料は、SiO2および木炭でありそれらの化学成分を表3.4に示す。

表 3.4 試料の化学成分

a)	日けい石(S10 ₂)		200 メッシュ以下		
	SiO_2	Fe_2O_3	$A\ell_2O_3$	CaO	MgO
	9 9.2 7	0.1 3	0.21	0.0 2	0.0 3
b)	木 炭		325 1	ッジュ90	96
	H_2O	V.M	Ash	F.C	(Ash分析)
	4.8 3	14.95	1.5 2	78.7	略

~ ~ ~

上記2種類の原料粉末を表3.5の割合で混合したものをアルゴン溶融して解析試料とした。

表 3.5 武 料 の 配 合 1) SiO_2 + 1 C 2) SiO_2 + 1.2 C 3) SiO_2 + 1.5 C 4) SiO_2 + 1.7 5 C 5) SiO_2 + 2 C

-61-



図 3.7 各組成の X線回折図

-62-
前年度において溶融の目的に検討した反応容器は、太陽エネルギーを照射加熱すると、数秒で反応容器内に試料からの蒸発物が全面に付着し、入射エネルギーを遮断して長時間の溶融実験は困難となる。しかし、今年度の検討対称となっている反応容器は蒸発物の付着防止として、入射方向部分の反応容器を2重構造にし、ガスを前面から 押入し試料に対して吹きつける方法を考案した。この反応容器は試料からの蒸発のため入射エネルギーを遮断する ことがなく長時間の溶融実験が可能である。これらの概略図を図3.8(a)および(b)に反応システムを図3.9に示す。

反応容器(透明パイレックスフラスコ)と装置間には、ガス漏れの少ないように周囲から帯状の環で締めつける。 との場合、反応容器内を減圧したのちガスを送入し、試料に対して直接ガスが到達するように十分な流量(約1気 圧)が必要である。



図 3.8 反応容器 (a)



🖾 3.8 (b)



- 1. ガスボンベ (**Argon**)
- 2. シリカゲル
- 3. 流量計
- 4. 真空ポンプ

- 5. 反応容器
- 6. 太陽炉(放物面鏡)
- 7. トラップ

図 3.9 ガス雰囲気反応装置概略図

3.4.4 解析結果

反応容器から回収された蒸発試料の色は灰黄色で、組成はX線回折の結果、SiO₂+C,SiO₂+1.2CおよびSiO₂+1.5Cの組成試料は大部分がSiの構成相であったが、わずかに4Å近辺にSi-O結合を示すものと考えられるハローおよびSiCと思われるプロードラインが認められた。さらに、SiO₂+1.75C,SiO₂+2Cの組成試料についてはSi+SiCの回折線の他にSi-O結合を示すハローが観察されている。これらのX線回 折図(SiO₂+1CおよびSiO₂+2C)および生成相を表3.6および図3.10に示した。

	組	成	蒸発物の構成
1)	SiO $_2$	+ 1 C	S i
2)	S i O_2	+ 1.2 C	S i
3)	S i O $_2$	+ 1.5 C	S i
4)	SiO $_2$	+ 175 C	
5)	SiO_2	+ 2 C	

表 3.6 SiO₂ - C系の生成相

以上の結果、SiO₂ + 1 C, SiO₂ + 1.25 CおよびSiO₂ + 1.5 Cの 組成試料がSi を生成するのに最も 良い配合組成であることを確認し、この試料について2, 3の実験を行った。

その結果、次のようである。

1) 生成物の螢光X線回折

Si とその他に、不純物としてPb, Zn, Co, Fe, Ca, K, Mg が認められた。

2) 生成物の化学分析

得るれた試料が少量のため、断定的な結論は得るには至らなかったが、次のように推定される。

 Si
 $20 \sim 40 \%$

 SiC
 $2 \sim 10 \%$

 SiO₂
 $50 \sim 75 \%$

水分その他 5~10 %

(SiO はSi +SiO₂ に分解して存在するものとして)

化学分析の方法としては、試料をアルカリ溶融法により、Si,SiO₂、SiO をすべてSiO₂の形態となし、重量法により、その組成を推定する方法をとった。

3) その他

a 吸着水:100 ℃で乾燥したときの減量5.6%

b HF不溶解残渣: 4.7%(これはSiC の存在の可能性を示す)

C 強熱による重量増加: 28.9 %(Si またはSiO の酸化によるSiO₂の生成)



3.4.5 まとめ

以上原料珪石から還元による粗シリコンの製造に際しての反応条件,その他について検討を加えたが今回のSiO₂ +1 Cの試料の調査結果では,Siの生成量が1.5 Cの試料に比較してやや低い値を示しているようである。何れ にせよ短時間の照射加熱により20~40%のシリコンの生成が推定されておりSiO₂に対するC量の選択,その 他反応条件如何によっては,Siの生成量をさらに増加することが可能と考えられる。太陽炉による溶融により SiO₂とCから金属けい素が生成することから,今後この反応の収率向上を始めとして反応動力学的な研究を行う 必要があると考えられる。

3.5 第4ステップ(太陽光による多結晶シリコンの製造)

3.5.1 まえがき

現在最も標準的な手法として用いられている塩化シリコンの水素還元法による多結晶シリコンの製造には多大な 電力が必要とされる。電力原価の高騰に伴いその製造原価中に占める割合はさらに増加の傾向にあり何らかの対策 が望まれている。

ここでは熱源を太陽光に求めて省エネルギーを多結晶シリコンの製造に関して試みた。

この装置の設計に際しては従来の多結晶シリコン製造装置を基本に考えたがFZ用の棒状多結晶シリコンの製造 は装置的な困難が予想されたので、多結晶シリコンの形状については特に問わず今回はその製造条件の検討を行う ことを第一義としている。

3.5.2 装置の構成

基本設計条件

熱 源 : ヘリオスタット式太陽炉 出力2KW

(1) 反応ガス供給装置

(図3.11)

水素配管はトリクロロシランの気化用と希釈用の2つが設けられている。気化用水素によりトリクロロシラン の必要量を取り出し、次いで希釈用水素で反応ガス濃度を調節する。

窒素配管は保安上の目的で設けられ、反応装置内の置換により水素爆鳴気が作られる事を防止する。

(2) 反応装置

図3.12, 3.13, 3.14, 3.15 に示すように反応装置はシリコン析出基盤から冷却水装置に至る4つの部分 により成り立っている。

i) シリコン多結晶析出基板

材質はグラフアイトで析出面積は太陽炉の出力より算出して 8 cm と設計された。

ji) 反応容器

材質は透明石英で反応中内面へのシリコン析出を防止するため一定温度以下となるように設計された装置空 冷用の送風設備を有する。送風装置は反応ガス漏洩時には大量の空気でこれを希釈し爆発事故を防止する目的 も兼ねている。

ⅲ) 測定装置

保護管付きの熱電対(P.R)を反応器プレートのガス出口より入れ析出基板の裏面へ接触させる。



図3.11 太陽光利用シリコン製造実験設備 概略図



図3.12 反応装置

-69-



図 3.13 太陽炉に組み込んだ反応装置



3. 図 3. 1 4 反応容器



図 3.15 照射加熱中の反応容器

jy) 冷却水装置

反応装置の冷却・保護を目的として反応器プレートに冷却水を流す設計となっている。反応器プレート温度が50 ℃を越えぬ様に冷却水量及び冷却水流路を調節してある。

(3) 反応ガス定量装置

ガスクロマトグラフ本体とガスサンプラーより成る。反応ガス出口は水封(50 mm)とし,この背圧によりガ スサンプラー中に反応ガスの一部を定容分取する。

3.5.3 反応条件の設定

基本条件 Si 収量 ≥ 0.5 9/hr

(1) 反応ガス量

熱平衡論の立場に立った反応の検討によって、シリコン製造における最大転化率など反応条件の設定に必要な反応の基礎的条件は図3.16に示すように明らかにされている。しかしながら、一般に化学反応を用いた物質の製造を考える場合に必要な個々の反応の動力学的な研究はまだ十分進んでいると言えない。

多結晶シリコンの析出量は次式で与えられると考えられ

$$Si (dep) = J \cdot \eta \cdot \beta$$

- J : 供給されるSi 量
- η : 熱平衡でのSi 転化率
- β : 平衡到達率

また,実験的にえられたβの値も多く報告されており図3.17 に示す通りである。しかし,この平衡到達率は

反応ガスの供給状態及び装置形状等反応容器内のガス流動に依存していると考えられて反応装置の固有の特性が 大きく作用している。収率を文献等より予想する事は困難ではあるが安全側に考えて収率25%を仮定し供給ガ ス量を設定した。

(2) 反応ガス濃度

反応ガス濃度は①反応容器内面へのシリコンの析出を回避するため、②収率を高くするため、の2点を考慮し 比較的低濃度(4 mol %, Cℓ/H= 0.06)で実施した。

(3) 反応温度

反応率の最も良いと思われる1.200 ℃を選んだ。ただし温度制御の困難が予想されるので,実験の温度はシ リコンの融点(1.420 ℃)を越えぬ様に安全な温度範囲を設定する必要がある。

3.5.4 解析結果

(1) 反応ガスの定量

水素をキャリヤーとして反応器に導入されるシリコン塩化物に反応条件においてある平衡状態にある。固相成 分としてはSiのみであり気相成分としては H_2 , C ℓ_2 , C ℓ , HC ℓ , Si, Si H_4 , Si H_3 C ℓ ,



図 3.16 全圧が1気圧でのCL/Hと気相中のSi量との関係図



図 3.17 多結晶シリコンの析出率と反応温度の関係図

SiH₂C ℓ_2 , SiHC ℓ_3 , SiC ℓ_3 , SiC ℓ_2 , SiC ℓ 及びSi₂C ℓ_6 がある。この内実験条件下ガス クロの測定限界10⁻⁴ atm 以上の分圧を有する分子種 はH₂ 以外にHC ℓ , SiH₂C ℓ_2 , SiHC ℓ_3 , SiC ℓ_4 及びSiC ℓ_2 である。全圧が1 atm でのC ℓ /H =001 とC ℓ /H = 0.1のときの熱平衡状態を図3.18 と 3.19 に示す。

この内SiCl2は低温で不安定であり

$$2 \operatorname{SiC} \mathcal{L}_{2} (\mathcal{G}) \xrightarrow[1200^{\circ}C]{1200^{\circ}C} \operatorname{Si} + \operatorname{SiC} \mathcal{L}_{4} (\mathcal{G})$$

なる不均化反応でSiとSiC ℓ_4 を生じることが知られ



アバランスや把握つた。 を生じる。この点補正の必要がありSi析出基板の重量を反応の前後で実測しSiの収量はこれから推定した。 ている。析出面にではなく低温部(反応器等)に析出する Si はガスクロマトグラフ分析による Si 収量に誤差 上記4つの分子種HCと, SiH₂C ℓ_2 , SiHC ℓ_3 及びSiC ℓ_4 について測定し, CL 収支をとって系のマテリア

(2) 実験結果

以上の反応による結果を要約すると次の通りになる。

反応時間 1時間

析出面温度 1.200 ± 200 ℃

山田温威 1.200 エ 200 HC L。供給量 9.1 9

SiHC L₃供給量 9.1 9

Si 析出量 0.43 9

ガスクロ分析による反応ガス組成の変化を反応容器に出入するガスに分けて表3.7および表3.8に示す。

表 3.	7 反応器入ガン Umol/5ml	ス組成 mol/hi	
H ₂	µmol/5ml 196.28	mol/hr 1.625	mo L/mc
S i HC ℓ_3	8.0 8	0.0 6 7	0.0 4
Σ	204.36	1.692	1.00
。羊	·并讲话学型 o	7 (1) cl ²	

	Σ	S i C ℓ_4	S i HC ℓ_3	S i H $_2$ C ℓ_2	HCL	H_2		5 76
-73-	204.36	0.3 6	5.3 8	0.1 2	6.2 1	192.29	μ mol/ 5 ml	
	1.710	0.0 0 3	0.045	0.001	0.0 5 2	1.609	moℓ∕hr	, Yri'nyr
	1.000	0.002	0.026	0.001	0.030	0.941	moℓ∕mo1	

図 3.20 a

٢

			Ĩ.	•								
INLET GAS					L3					 		
SAMPLER VOLUME	5 m l	<u> </u>			Sic				· · · · · ·			
CARRIER GAS	H ₂ : 0.5 m l∕s e	c			н							
INDOOR TEMP	25 °C				Δ		1 1 1 1 1 1 1 1 1 1				o	
CHART SPEED	6 cm/min				/				· · · · ·	 		· · ·
RANGE	6.4					-1 					-	
IMINGE	0 *											
							-					
											•	
		r	\$			-			 .	 		
						\uparrow				:		
										·	N	<u> </u>
										•		
			<u>-</u>						-			
				J				-				
					-						C	
								:				
						Ì.			L			

図 3.20 b

	OUTLET GAS	5 ml		C13		
	CARRIER GAS	H ₂ : 0.5 ml/sec		0 HSi		
	INDOOR TEMP. CHART SPEED	25°0 6 em/min		\wedge		-
	RANGE	64		$ \rangle \rangle$		
	HC					
	$ \left \right $					
		Sid1				
		H ^H	1		φ α	
5						

これらの結果より反応収率を求めると、表3.9の通りである。

表 3.9	製造成績	収 率	22%
		平衡到達率	37%
		HSiCl。実消費量	1.5mol/Si(dep) mol

3.5.5 まとめ

収率は22%と低いが反応条件の検討により改良の可能性はある。また副生が予想された4塩化シランが予想外に 少く3塩化シランの消費効率が高いことは注目に値するものであろう。今後の検討が期待される。

装置的に検討されるべき課題としては次の3点が上げられる。

① FZ用棒状多結晶シリコンの製造装置の開発

② 温度制御装置及び補助熱源装置の開発

③ 太陽炉の基本構造の検討

太陽光を熱源に用いた場合,装置設置面積当りの多結晶シリコン製造量は,現状のプロセスと比較して約20倍程 度に増加することが予想される。操業規模の製造設備としてはこの点根本的な対策が必要となろう。

参考文献

1) L.P.Hunt and E.Sirtl, J.Electrochem. Soc. 119, 1741(1972)

2) L.P.Hunt, D.H. Sawyer and E. Sirtl, J. Electrochem. Soc. 121, 919(1974)

3.6 結 言

昭和51年度においては、先ず太陽電池用シリコンの生産のプロセスに関する経済的検討と、その研究開発の例を 調査し、次いで原料珪石よりシリコン単結晶生産に至る5つのステップの中、第1ステップすなわち珪石の還元によ りシリコンの生成と、第4ステップのトリクロロシランの太陽熱による分解と多結晶シリコンの生成について重点的 に検討を行った。

第1ステップにおいては、太陽エネルギーの極く短時間の照射でSiO₂+1.0~1.5 Cの組成からSi の生成する ことが推定された。なおこのような反応形式を取る場合のSi の分析手法に関しては従来の重量法を採用したが、Si SiO, SiO₂, SiC 等の混在下におけるSi の正確な定量法を確立する必要があろう。

第4ステップについても、トリクロロシランの分解による多結晶シリコンの生成が認められた。

以上の各ステップにおける Si の生成量は何れも 20 ~ 40 %台で今後反応装置の改良と工夫を加えることや,温 度制御技術の向上により反応収率の向上が期待される。

太陽光発電におけるシリコン電池の生産において,そのエネルギーバランスに問題点のあることは既に指摘されていることである。

シリコン太陽電池の研究開発においてはその素子ならびにデバイスの開発に主眼がおかれて原料シリコンの生産過程の検討が少ないように見られ、その点で本小委員会の果した役割は十分なものではないにせよ評価されるべきであろう。

4 大型太陽炉の経済性分析・保守安全と化学反応を伴う高温操作

4.1 緒 言

太陽炉第3小委員会は昭和51年度において太陽炉の用途として,高温の化学反応を中心とする利用方法を探求し それらの場合に適合する炉心部の構造解析を行うと共に,大型太陽炉の経済性保守・安全を検討することを目的とし ている。今年度はさらに最終年度でもあるので太陽炉の立地条件も併せて検討することとなり,本小委員会に気象お よび立地の専門家の参加の必要が生じた。そこで本小委員会委員として,財団法人日本気象協会研究所より吉田作松 財団法人日本工業立地センターより三本季雄の両氏をあらたに委員に委嘱した。

4.2 第3小委員会の活動経過

4.2.1 第5回第3小委員会(昭和51年7月16日)

三菱重工広島研究所で開かれ、51年度の研究テーマに何を取上げるかについて討議した。昨年度からの、ガス 反応および蓄熱の2テーマの他に、次の3つのテーマを加えることとした。すなわち

1 大型太陽炉の経済分析

2. 太陽炉の立地条件

3. 太陽炉の安全性およびメインテナンスである。これらについて、具体的な進め方は次の通りである。

1. 太陽炉の経済分析

この研究は太陽炉から得られるエネルギーのコストを計算して、他のエネルギー源と比較した太陽炉の経済性 がどうかといった経済分析を行うものではない。むしろスケールメリットの有無などを考慮して、太陽炉の大き さをどれ位にすれば、エネルギーあたりの単価はいくらになるか、を考えて、太陽炉の大きさの最適化をケース スタデイーによって行なう。コストは素材と工数の和で出すよりも、51年現在の価格で出すことにした。ただ しガス反応と蓄熱についてどんな反応を想定した太陽炉にするかは末定であるので、実用を目的とした炉心部は 経済計算には入れないこととした。

この大型太陽炉の経済分析は、塚田、柳両委員が担当することとした。

2. 太陽炉の立地条件

日本国内での立地を前提に、絶対条件として日射強度を取り上げ、到達可能温度レベルを考えて調査する。また全世界についても同じやり方で考察する。

本テーマに関して、太陽熱発電小委員会が日本工業立地センターに昭和49年に委託した、太陽熱発電所適地 調査の報告書が配布された。

この太陽 炉の立地条件の調査は,野口,吉田,三木の3委員が担当することとした。

3. 太陽炉の安全性およびメインテナンス

太陽炉は他の炉とは異なり、安全のためにしゃへいすることが困難である。また光の空間伝播性により、危険がおよぶ範囲が 広く瞬時である。また光が集中していることが肉眼で感知できない。などのことにより他の炉などとは異なった対策を必要とす る。またメインテナンスも、光学系のメインテナンスといった一般工業製品とは異ったメインテナンスを要する。

このテーマは柳下, 佐々木両委員が担当する。

この3つのテーマの他に,前年度からの引続きの,ガス反応および蓄熱の検討については武藤,佐々木両委員 が担当することとした。 4.2.2 第6回第3小委員会(昭和51年9月21日)

三菱電機中央研究所で開かれ、次の諸項が検討された。

1. 太陽炉の立地条件

立地の絶対条件と考えられる日射量について説明された。日本の全天日射量地図によれば関東以西の太平洋岸の日射暈が多いことが示された。

直達日射量については日本ではほとんど測定されておらず、サンシャイン計画の一環として50年10月から 鹿児島で測定されているものが本邦唯一の利用可能なデータである。また今年ジュネーブで開かれた、UNES CO-WMOのSymposium on Solar Energy Utilijation の報告があり、太陽エネルギー利用機器 の開発側と、気象測定を行っている人々との間の協力が必要という意見が多かったといわれる。

2. 太陽炉の経済性

文献調査により太陽炉の大きさをパラメータとした経済性の評価が討議された。通信用アンテナのコストは直径の約2.7乗に比例することが紹介された。

3. ガス反応による蓄熱

水の熱分解,水の炭素による分解,水の分解に必要な太陽熱の量,水性ガスとの比較,水性ガス製造の効率が 紹介された。

4. 太陽炉の安全性とメインテナンス

太陽炉の安全性を,(1)太陽炉自体の保存,回太陽炉施設の従業員の安全,四太陽炉施設周辺住民の安全という 3 つの観点から考えるための,チェックリストが紹介された。また太陽炉のメインテナンスについてもチェック すべき項目が紹介され,これらについて追加意見が述べられた。

4.2.3 第7回第3小委員会(昭和51年11月16日)

名古屋工業試験所で開かれた。

1. 太陽炉の経済性

経済性を集光量の観点から見ると、パラポラ鏡の口経比と日射強度がパラメータとして考えられる。計算した ところでは、日本における日射量では、太陽炉は電気エネルギー発生用に用いてはベイしないということが示さ れ、したがって高温産業用を狙うべきであると結論づけられた。

2. 太陽炉の立地条件

立地可能な場所を調査するか, パイロットプラントの適地を調査するのか, 具体的な土地について立地可能か どうかのケーススタディを行うのかについて討議した。

3. 太陽炉の安全性

太陽熱利用のテクノロジーアセスメントのインパクトを検討した。

4. 報告書作成について

主査が報告書の目次案を作成し、12月8日の委員会に提出し、承認を得たのち各委員に配布する、それに従って各委員は報告書内容の案を作成し、次回小委員会に提出することとした。

4.2.4 第8回第3小委員会(昭和52年1月18日)

日本電機工業会で開かれた。

1. 太陽炉の立地条件

全天日射量から直達日射量を推定する方法が紹介された。現在わが国には全天日射量のマップはあるが直達日

射量のマップはないので、この方法で推定可能となれば、太陽炉の立地条件を検討するのがやりやすくなる。

2. 太陽炉の経済性

直達日射強度の年間の性質(強度分布,継続時間等)は炉心の温度レベルを決める第一因子であるだけではなく,蓄熱もしくは蓄エネルギー装置の必要性や能力にも関連するということが紹介された。

3. 報告書作成について

委員会で承認された目次にもとづいて、各委員が分担して作成する。

4.3 太陽炉の経済性

4.3.1 まえがき

太陽炉は他の太陽エネルギー利用システムのように、太陽エネルギーを補捉して使い易いエネルギーに変換する という用途よりも、次のようなカテゴリで他の電気炉、ガス炉では見られない特長を持っていることから間欠的で ありながらもその特長を生かせる用途にその価値が見い出されるものと思われる。

1. 高温かつ任意のふんい気で加熱できる。

2. 空洞放射加熱

3. 放射束密度が非常に高い。

4. 電場、磁場の影響が皆無である。

世界で既に160 基あまりの太陽炉が建設されている(一部で耐火物の生産なども実験的に行われている)が, 殆んどが特殊目的の実験設備,研究設備であり,既存の装置に置き換えるとしてその経済性を云々するところま で到達していないようである。その上,太陽エネルギー利用はそれが「クリーン」であることが現時点ではそれ ほどメリットとして強調されていない。しかしながら,例えば現行の火力発電所がNOx, SOx を完全に除去 するに必要な設備をつけることを義務づけられたとした時の発電コストはいくらくらいに上昇するかなどの問題 も近い将来提起されてくるのではないだろうか。表4.1 はその意味での発電コストの試算ではないが,重油ボイ ラにおいて出口NOx を50ppm程度にするための脱硫,脱硝装置をつけたとした時の重油コストの上昇を見た ものである。⁽¹⁾

このように,現時点では,太陽炉の経済性を云々するのはむつかしく,ここでは50~200 フィートの太陽 炉の建設費用がどの程度かを推定するにとどめた。

4.3.2 太陽炉のコスト推定

太陽炉の光学系としては,種々考えられているが,50~200 フィートの大型太陽炉は光軸水平ヘリオスタット式に限定される。そのシステム構成は図4.1のようなもので,太陽熱発電(タワー集光方式)システムと比較した場合,ヘリオスタットの他に高精度の鏡面を有する大口径のパラボラ鏡を必要とする点,更に太陽炉の場合一基で10.000KWt級の大容量のものは想定しにくく スケールメリットも少ない点から,太陽炉の方が高価であるという感じが強い。

(1) パラボラ鏡のRIM-ANGLEの選定

放物面鏡太陽炉の性能を見るパラメータとしては, 焦平面でのエネルギー密度(flux)があり, 次のように 与えられる。

 $f lux = 46.1 \times 10^3$ E.Po.sin² θ

ここで. 集中率 : $C = 46.1 \times 10^3 \sin^2 \theta$

E : 系全体の効率

Po : 太陽定数(0.033cal/sec/cm²)

 θ : " ? ? ? ? O RIM ANGLE

一方, 光軸水平へリオスタット式太陽炉のコストがパラボラの開口径(D)の β 乗に比例するとすれば,

	O3 酸化同時脱硫,脱硝	乾式脱硝+湿式脱硫
変動費		
ボイラ燃料	2 4.5千円/kl	24.5千円/kl
変動費		
吸収剤,電力,水	1 2.3	1 3.3
固定費		
償却,金利	8.3	7. 3
合計	4 5.0	4 5.1

 $\cos t \propto (4 f \frac{\sin \theta}{H \cos \theta})^{\beta}$

表4.1 重油1 kl当りのコスト比較

₃₀ Ton/hr, 稼動率 4000^{時間/年} ボイラ容量(出口NOx 濃度50ppm)

	COST PER HELIOSTAT
• Reflector Subassembly	\$ 609
• GUIDANCE TRACKING & CONTROL Sabassembly	75
• MOUNTING AND ACTUATORS	474
○ PEDESTAL	222
\circ HANDLING, ASSEMBLY AND INSTALLATION	171
• MINI-COMPUTER FIELD CONTROLLER	288
• ALLOWANCE FOR CONTINGENCIES AND SPARES 10 %	184
TOTAL	\$ 2.0 2 3

表 4.6 COST ESTIMATION OF 30M² HELIOSTAT (JUNE, 1975)

ここで炉心の大きさ(d=f・a)が1定(f=const)の太陽炉において,RIM-ANGLEに対してC, $\partial C/\partial \theta$,flux/cost,(flux)²/costを β =1.5と1.8の2ケースについて算出した結果を図4.2,4.3 に示す。図4.2から,RIM-ANGLEが大きいほど集中率は高くなるが、 $\partial C/\partial \theta$ の観点から θ =45°程度が 効果が最大で,図4.3も合わせて考察すれば、 β =1.5の場合、 θ =50°~70°のバラボラがCOST OPTI MUMで β =1.8とCOSTがバラボラの径に大きく影響されるほど θ =30°~60°とRIM-ANGLEの小さい 方にOPTIMUM が移って行くと言える。

(2) 太陽炉のFURNACE FACTOR

ヘリオスタット式太陽炉において、その効率は各要素ごとに表4.2のように見積られており、そのFURNACE

FACTORF)は次のように与えられる。

 $\mathbf{F} = (\eta \mathbf{t}^2. \eta \mathbf{r}. \eta \mathbf{g}. \eta \mathbf{f})^2. \eta \mathbf{s}. \eta \mathbf{c}. \eta \mathbf{a}$

= 0.35 ~ 0.69 (裏面鏡)

 $= 0.45 \sim 0.75$ (表鏡面 η t = 1.0)

太陽炉において反射面材料は反射率と,耐久性の面から検討を加えられ選ばれねばならず,この種の自然エネ ルギー利用装置では一旦,建設してしまえば保守費の他,殆んど経費を必要としないものであり,厳密な原価計 算はしていないが,耐用年数の10%の増大がFURNACE FACTOR 5%程度の増大と同程度の効果が期待出 来るのではないか。その点から見ると,反射面は裏面鏡が適しているのではないかと考えられる。表4.3は世界 の幾つかの太陽炉の性能をまとめたものである。⁽³⁾

これより, FURNACE FOCTOR も前出の値がほぼ妥当な見積りであると期待できる。

(3) 太陽炉のコスト(単一ヘリオスタット式)

図4.4は次のような条件で設計された太陽炉の概念図である。

炉心の大きさ $\alpha = 6^{''}$

 $f lux = 300 ca l/se c/cm^2$

直達日射量 $\eta a. Po = 0.0285$ cal / sec / cm²

ペラボラ鏡は扇形の裏面鏡を調整ネジで調整して形成することにし、表 4.3 における INDEX OF GEOME TRICAL PERFECTIONとしては $\sigma = 60$ %を採用している。

太陽炉システム



図 4.1 太陽炉,太陽熱発率システム構成図

Symbol	Factor	Estimated Value
ηt	Glass tansmissivity per pass	0.94~0.98
ηr	Surface reflectivity per surface	0.91~0.95
ηg	Geometrical imperfections, per mirror	0.9 0~0.9 6
ηf	Mirror frame Shading. per mirror	0.94~0.98
ηs	Tower Shading	0.8 5~0.9 5
ηc	flux control shading	0.95~0.99
ηа	Alignment factor	0.95~0.99
	Over - all furnace factor F	0.3 5~0.6 9

表 4.2 Typcal Transmissivity Factors for a

Two-mirror Parabolic Furnace



RIM-ANGLE(0) DEGREE

■ 4.2 VARIATION OF CONCENTRATION WITH RIM ANGLE



R.1 M	ANGLE(A)	DEGREE

⊠ 4.3 VARIATION OF FLUX AND COST OF SOLAR FURNACE EMPLOYING A PARABOLIC CONCENTRATOR WITH RIM ANGLE

この推定は一例であって、例えば120 -FT の太陽炉について図4.6からの推定と別の試算結果を表4.5 に 比較しているが^[3],内訳の比率はほぼ合うというものの、全建設費は略70%の違いがある。このように設計の

表4.4は,この100ftパラボラ太陽炉の建設費の内訳で,太陽炉のみの コストで土地,建物,太陽炉の安全シャッタ等は含めていない。

即ち,建設費は次のように計算され

ている。

装	置	賮	\$ 785.000
設計	†及て	》技術料	8 0.0 0 0
反身	す面の)調整費	8.0 0 0

全費用 **\$**863,000 (2億5千900万円)

更に,図4.5.4.6はこの100ft の太陽炉の建設費から50~200ft の太陽炉のコストを次のような仮定で

推定したものである。

(1) 反射面及びその支持構造はパラボラ鏡の直径の2乗に比例

(2) 支持構造及び基礎は直径の3乗に比例

(A)	f lux/cast	$\beta = 1.5$
(B)	flux/cost	<i>β</i> = 1.8
(C)	$(flux)^2/cost$	$\beta = 1.5$
(D)	$(f \ln x)^2 / cost$	A = 1.8

(3) DRIVE AND CONTROLなどは直径の1.5 乗に比例

(4) 技術料はパラボラの直径に比例

(5) 反射面の調整費用は面積に比例

FURNACE	DIAMETER (ft)	Reflection material	RIM ANGLE θ (degree)	Temp (K)	FIux cal/sec/cm ²	" A	^η R	Case E (%)	Ι σ (%)	Case E (%)	<u>Π</u> σ (%)	F
MONTLOUIS	3 5	glass	4 1	3,270		0.8 5	(0.82) ²	2 4.0	4 1.9	3 0.6	5 2.5	28.2~36.0
ALGIERS	2 7.6	alum inum	3 6.5	3,270		0.8 5	0.80	3 0.3	4 3.2	3 6.7	54.0	3 5.6~4 3.2
FORDHAM	5	glass	6 0	3,610	_	0.76	0.80	2 1.3	3 3.7	2 5.6	4 2.1	28.0~33.7
JAPAN *	6.5	aluminum	75	2,370	-	0.76	0.8 0	3.3	5.4	4.0	6.6	4.3 ∼ 5.3
CONVAIR	5	glass	6 0		665	1.00	0.80	57.6	7 1.5			57.6
CONVAIR	1 0	aluminum	83	-	96	1.00	0.80	1 0.8	1 3.5	-		1 0.8
Nat, Bur. Št	5	rhodium	6.0	3,570		0.7 6	(0.85) ²	2 3.5	4 2.8	2 9.4	5 3.5	3 0.9~3 8.7

表4.3 Efficiency Factor and Index of Geometrical Perfection

for Various Solar Furnace

$$\begin{split} \mathbf{E} &= \eta_{\mathbf{R}} \cdot \eta_{\mathbf{S}} \cdot \eta_{\mathbf{A}} \cdot \sigma & \mathbf{F} = \eta_{\mathbf{R}} \cdot \eta_{\mathbf{S}} \cdot \sigma = \mathbf{E} \neq \eta_{\mathbf{A}} \\ \eta_{\mathbf{R}} &: \text{Overall reflection efficiency of the reflecting surface} & \text{Case I: only heat Joss was by radiation} \\ \eta_{\mathbf{S}} &: \text{Shadowing efficiency} & \text{Irom a cavity} \\ \eta_{\mathbf{A}} &: \text{Fraction of the solar constant at the site} & \text{Case II: heat loss by conduction and} \\ \sigma &: \text{Index of geometrical perfection} & \text{convection was equal to 20\%} \end{split}$$

* 名工試第一号直達型太陽炉

** 名工試第二号ヘリオスタット型太陽炉はこれとほぼ同等

of the heat loss by radiation



☑ 4.4 GENERAL LAYOUT OF 100 FT SOLAR FURNACE

考え方,狙うべき精度(温度レベル)などによってかなりの違いが出るのは止むを得ないことかもしれない。 (4) 太陽炉のコスト(分散型ヘリオスタット)

一分散型ヘリオスタット式太陽炉のコスト推定についての文献は見当らないが、 との場合は太陽熱発電(タ ワー集光方式)のヘリオットの研究の結果から略々推定できる。

図4.7はヘリオスタットの大きさに対応したコスト比率を示す1例であり、この場合最高値は略7.2m×7.2 mの大きさのヘリオスタットと示されている、太陽炉の場合は先にも述べたように1000kWt 程度が最大のも のと考えられ、仏CNRSの太陽炉を例にとってもヘリオスタットは6m×7mのものが63台であり、太陽熱発 電の場合のような何万台という大量生産のメリットは期待できない。

しかし,太陽熱発電(タワー方式)用ヘリオスタットが,そのままでないにしろ太陽炉用のヘリオスタットに 使用出来ると期待できよう。

表4.6は、太陽熱発電で試算されたヘリオスタットのコスト内訳であり、1975 年 6月時点で**\$**2.000強/ Heliostatと報告されている。⁽⁵⁾

COMPONENT	COST OF MATERIAL AND CONSTRUCTION	PERCENT OF TOTAL COST	REMARKS
CONCENTRATOR	\$\$ 196,300	2 5.0 %	○ APERTURE : 100FT
•REFLECTING SURFACE	1 1 3.8 0 0	1 4.5	°FOCAL LENGTH: 53.7 FT
AND PRIMARY SUPPORT			OSURFACE: 8,280 sq FT
○ STRUCTURE	6 6,8 0 0	8.0	•BACK SILVERED "
• FOUNDAT I ON	1 5.7 0 0	2.0	$\begin{array}{l} \text{CURVED} 3 \text{ ft} \times 3 \text{ft} \times 0.25 \\ \text{GLASS} \end{array}$
			○HEIGHT:132FT
HELIOSTAT	\$ 392,500	5 0.0	WIDTH: 126FT
•REFLECTING SURFACE	160,900	2 0.5	AREA: 16000 sq FT
AND PRIMARY SUPPORT			°FLAT BACK-SILVERED
• STRUCTURE	204,100	2 6.0	3FT×3FT×025″GLASS
○FOUNDAT I ON	2 7,5 0 0	3.5	
EQU I PMENT	\$ 157,000	2 0.0	
OTURN TABLE	117,800	1 5.0	
ODRIVE AND CONTROL	3 9,2 0 0	5.0	
			○PLATFORM 10 FT×20FT
TOWER	\$ 3 9,2 0 0	5.0	
◦STRUCTURE AND FOUNDATION	1 5,7 0 0	2.0	
OELEVATOR	2 3,5 0 0	3.0	· · · ·
TOTAL	\$\$ 785,000	100	

表 4.4 RELATIVE COST OF RARTS OF A SOLAR FURNACE

CONSISTING OF A 100FT FIXED PARABOLA

CONCENTRATOR FOCAL FURNACE TOWER

AND A TRACKING HELIOSTAT

	ESTIMATE A (EXTRAPOLATED)	ESTIMATE B
CONCENTRATOR	2 5.6 %	36.0 %
HELIOSTAT EQUIPMENT	69.4 %	61.0 %
TOWER	5.0 %	3.0 %
ESTIMATED TOTALCOST	\$ 1,216,000	\$ 2,160,000

表 4.5 COMPARISON OF COST ESTIMATES FOR

120-FT PARABOLIC SOLAR FURNACE



☑ 4.5 VARIATION OF COSTS OF MAJOR COMPONENTS
 ☑ 4.6 OF A PARABOLIC SOLAR FURNACE
 WITH DIAMETER

DIAMETER OF PARABOLIC CONCENTRATOR(ft) 2 4. 6 VARIATION OF COST OF A PARABOLIC SOLAR FURNACE WITH DIAMETER



HELIOSTAT DIAMETER ACROSS FLATS

🛛 4.7 Relative Cost Versus Heliostat Size

尚, 仏CNRS 1000KWt 太陽炉の建設コストは, 1967年当時で土地, 建物を除いて ヘリオスタット(6m×7m-63台):7百万フラン(4億9千万円)

パラボラ(0.4 5 m×0.4 5 m-9500枚), 試料室:5百万フラン(3億5千万円)

と報告されているが他の詳細は調査できていない。

4.3.3 まとめ

大型太陽炉の経済性は,建設費が太陽熱発電(タワー方式)より高く.高温を狙う場合は,直達日射量が0.4~ 0.6 KW/㎡ 必要であることから稼動率の点でも劣っている,この点からみれば単なるエネルギー変換装置として は,太陽熱発電が実用化された後になるのであろうが,最初に述べたような他の炉に見られない特徴があり,これ を生かすことができれば十分にその価値が認められよう,ここでは経済性を云々するまでに至らず又太陽炉の建設 コストの推定も調査不足で半端なものになった感があるが,今後,用途の調査と合せて系統だったコストのケース スタデイも必要であろう。

参考文献

- (1) 井関,「公害防止に関する電気技術講習会」51年11月
- (2) RAYMOND W BLISS [NOTES ON PERFORMANCE DESIGN OF PARABOLIC SOLAR FURNACE] Solar Energy Vol.1. Nol. (1957)
- (3) NEVIN K. HIESTER, THOMAS E.TIETZ AND ROBERT E, DE LA RUE, Jr. [ECONOMIC FACTOR IN FURNACE DESIGN] Solar Energy Vol. 1. No 2.3 (1957)
- (4) C.R EASTON, C.R APPLEBAUGH AND J, H.NOURSE [HELIOSTAT DESIGN FOR A CENTRAL RECEIVER SOLAR POWER PLANT]
- L.L.VANT-HULL AND A.F.HILDERBRANDT
 Solar Energy Vol. 18. pp 31 ~ 39 (1976)

4.4 炉心部の経済性

4.4.1 まえがき

太陽炉の用途は今までの研究でいろいろあげられてきたが,具体的な炉心部の計画は必ずしもでき上っていない。 また,太陽炉の使用をエネルギー利用という立場からみた場合,他の太陽エネルギー利用装置との相違は炉心部の 温度が高いという特徴を持っている。現在世界にある太陽炉はエネルギーを利用するというよりも,むしろ高温を 利用して,他では行うことのできない処理をするという形のものであり,必ずしも,①エネルギー効率を良くする ということ。②炉の稼動率を上げるということ,を考慮に入れて設計されていない。そこで,炉の経済性の基本と なる「エネルギー効率」および「稼動率」について,ここで検討を加えてみる。

4.4.2 炉心部のエネルギー効率

太陽炉のエネルギー効率をどのように定義するかについてはいろいろの方法があるが、一応ここでは全体の効率 を ① 集光系の効率 ② 炉心部の効率 ③ 利用システムの効率 から成ると定義する。 集光系のエネルギー効率は,鏡の反射率,太陽追尾精度に関係する量である。炉心部のエネルギー効率は,炉心 部の構造によって違ってくるが,一般的に考えると,炉心部の温度,炉心部の大きさ、集光倍率,さらには太陽光 の法線面直達日射強度に関係してくる。利用システムの効率は,プロセスによって変り一般化することはできない。

ここでは、炉心部のエネルギー効率(η_F)に検討を加えてみる。まず炉心部に入るエネルギー量を計算するために炉の集光系の構造が必要であるが、それを図式的に示すと図4.8のようになる。

ヘリオスタットの鏡面に入射した太陽光は反射されてパラボラ鏡の光軸に平行に入射する。この場合、パラボラ 鏡のほぼ表面全体(面積 A₀)に反射光が入射するようにヘリオスタットの大きさが決められている。パラボラ鏡 で反射した光は炉心部の一点に集められるが、太陽像に大きさがあることと、ヘリオスタットの追尾誤差によって ある面積 A₁を持っている。

面積 A1 に入るエネルギーQ1 は

$$Q_1 = DN.R_h.R_p.A_o$$
 (1)
ただし DN:法線面直達日射強度
 $R_h:平面鏡(ヘリオスタット)$
反射率
 R_p :パラボラ鏡反射率
 A_o :パラボラ鏡投影面積

となる。

面積A1 部のエネルギー密度 Q1は

$$q_{1} = Q_{1} \swarrow A_{1}$$

$$= DN \cdot R_{h} \cdot R_{p} \cdot \frac{A_{0}}{A_{1}}$$

$$= \Psi \cdot D N$$

$$t_{t} t_{t} \cup$$
(2)

Ψ:集光係数(仮に定義する)

となる。

一方、炉心部の温度はシステムの制御系から決定される。もちろん、到達できる最高温度は q_1 によって決って くるものである。炉心部の温度を t_1 (C)とすると、炉心部からの熱損失 Q_L は次式で表わされる。

 $Q_L = Q_{FL} + Q_{RL} + Q_{HL}$ (3) ただし Q_{FL} : 面からの反射損失

Q_{RL} : 面からの輻射損失

Q_{HL} : 炉心部からの熱損失

 Q_{FL} は、炉心部構造および構成材料の反射率によって決る総括輻射係数ダに、入射光量を掛けたものになる。 すなわち、 $Q_{FL} = (1 - \phi) \cdot Q_1$ (4) となる。 Q_{RL} は、炉心の温度と炉心部の窓の面積との関係で $Q_{RL} = A' \phi \cdot \sigma (t_1 + 273)^4$ (5) ただし

A': 炉心部の窓面積

σ : ステファン・ボルツマン定数

で表わされる。



(集 光 系)



 Q_{HL} は炉心部構造に関係するもので、一般的に表わすことは困難であるが Q_{FL} , Q_{RL} に比べて少ないのが普通である。

今、炉心部で平面が Iの位置に受光面があったとすると、効率 η_F は

$$\eta_{\rm F} = \frac{Q_1 - Q_{\rm FL} - Q_{\rm RL}}{Q_1}$$

$$= 1 - (1 - \phi) - A_1 \phi \sigma (t_1 + 273)^4 / Q_1$$

$$= \phi \{ 1 - \frac{\sigma (t_1 + 273)^4}{q_1} \} \qquad (6) \qquad \geq \tau_{\rm F} z_0$$

もし, Iの位置ではエネルギー密度が高すぎて, 炉心部の受光面を持ってくることができず, Ⅱの位置に受光面 を置く場合を考えてみる。特に,間接的にチューブを使ってガス等を加熱する場合には, エネルギー密度が必要以 上に高いと, チューブ材料の寿命を短くする。また, 原料等を均一に加熱したい場合もあまりエネルギー密度が高 いと局部的な温度上昇が発生して設計がむつかしくなる。

この場合,窓の面積A'はA2と等しくなる。したがって,Ⅱ部での効率ηFは

$$\eta_{\rm F} = \frac{Q_2 - Q_{\rm FL} - Q_{\rm RL}}{Q_2}$$

= 1-(1-\phi)-A_2 \phi \sigma (t_2 + 273)^4/Q_2
= \phi { 1 - \frac{A^2}{Q_2} \sigma (t_2 + 273)^4 } (7)
ここで Q_2 = Q_1 と考えられるから

$$\eta_{\mathbf{F}} = \phi \{ 1 - \frac{\mathbf{A}_2}{\mathbf{A}_1} \quad \frac{\sigma (\mathbf{t}_2 + 273)^4}{\mathbf{q}_1} \}$$
(8)

となる。

今,集光係数 Ψ =10,000と仮定し、DNを日本での最高値に近い0.9 KW/ \vec{n} とすると、 q_1 = 7.74×10⁶ kcal/ \vec{n} h となる。その時の炉心部受光面がIにある場合の炉心部温度と η_F との関係を図4.9 に示す。図中に は法線面直達日射強度が0.6 KW/ \vec{n} , 0.3 kw/ \vec{n} の場合の計算値も記入してある。図からわかるように η_F が 急に下がる領域があり、炉の設計には炉心部の温度によって集光系の設計を変える必要が生ずることを示している。

図4.10は、炉心部の受光面を IIの位置($A_2/A_1 = 3$)にもって来た場合の効率をDN = 0.6 kw/m で計算 したものである。この図は、炉心部を少しでも最高エネルギー密度の位置 I からずらすと効率が非常に悪くなるこ とを示している。

前にも述べたように、エネルギー密度が必要以上に大きなところに受光面を持ってくることは設計上、また炉心 部の寿命の上で好ましくない。

式(7)の A_2 は式(5)に示すように炉心部の窓の面積であり受光面の面積を示すのではないので、回転溶解炉に応用されているように、受光面は位置 IIにし、窓は位置 I にして面積を A_1 にすると、図4.10に示す I の曲線となる。また、そのようにすると ϕ も大きくなる。たとえば A_2/A_1 が10になると ϕ が0.99 程度までなる。

この考えをチューブで熱を吸収する炉心部に適用すると、装置の概念は図4.11のようになり A_2/A_1 が非常に 大きくなり $\phi=1$ となる。また、パイプの裏面は断熱壁とすれば、反射面となり温度が均一化される。



図 4.9

以上述べたように,太陽炉の炉心は, open にしないで,図4.11に示すようにキャビテ ィにすることがエネルギー効率の上昇,すな わち経済性から考えて最も良い方法だと考え られる。

4.3.3 炉の稼動率向上

炉をなんらかの生産に使用する場合,必ず 原料を前処理するか,後で加工を加えるプロ セスがある。すなわち,システムの中の1つ のプロセスとして太陽炉を使用する場合がほ とんどである。そうであれば,日射量が変動 した場合にどのように他のプロセスとマッチ ングさせるか?日射がどれだけ継続すればシ

-89-







ステムとして運転できるか?ということが問 題となる。

太陽炉の立地条件の検討において,日射強 度があるレベル以上にある時のエネルギー量 をベースとして検討した。すなわち,図4.9 において,ある利用温度で効率がある一定値 以上ある場合の稼動率を考えに入れたことに なる。たしかに,耐火物を溶解したり,他の プロセスの発停が容易で短時間でできる場合 は,その検討で十分であり,一応の立地条件 の目安となる。しかし,第3小委員会でとり あげているような化学反応を伴うプロセスに おいては,システムの発停に少なくとも0.5 ~1時間以上は必要であり,そのような観点

から見れば、ある一定直達日射強度以上 の時間がどれだけ継続するかということ が立地条件の重要な因子となるとともに そのようなシステムを太陽炉で構成して はたして経済的であるかという問題にも なる。

図4.12 は現在日本で直達日射量を連 続的に観測した唯一の地点である鹿児島 のデータを解析したもので、0.6 kw/ \vec{n} または、0.3 kw/ \vec{n} 以上の日射強度が 継続した時間の1年間(昭和50年10 月〜昭和51年9月)の積算度数分布で ある。

図4.13 はそれぞれの日射継続時間の 全直達日射量の積算度数分布を示してい る。すなわち その継続時間のたて軸の 値が、その継続時間以上の日射継続時間

のある利用可能直達日射量となる。

直達日射強度 0.6 kw/n 以上で稼動でき、必要日射継続時間が 3 時間以上の太陽炉では図4.12 から年間の稼動時間は 572 時間であることが判り、図4.13 からは利用可能直達日射量は年間 3.9 × 10⁵ kcal/n しかな く、この年の鹿児島の全直達日射量が約 8.6 × 10⁵ kcal/n であるから、その半分以下しか利用できないこと になる。

以上述べたように、集光系の経済性を考えなければ、集光係数型を出来るだけ大きくし、しかもシステム上発停







を出来るだけ短くすることが炉心部の稼動 率を上げることになる。

また, 直達日射量は雲の動きによって非 常に早く変動する場合もあり, システムと しては, それに対応できるものではなくて はならないが それを集光系の絞りで行っ たのでは, さらに利用可能直達日射量が少 くなる。非常に早い変動に対しては, 炉心 部にある程度熱容量を持たせ対処する方法 を今後検討する必要がある。

4.4.4 まとめ

炉心部およびそれに続く部分の構成をエ ネルギー効率,および稼動率,すなわち利 用可能直達日射量という見地から検討した 結果,次のようなことが明らかとなった。

 ・ 炉心部の構造は、できるだけキャビ
 ティタイプにすべきである。

② 稼動率を上げるためには、炉心部に 続く部分を含むシステム全体の発停をで きるだけ早く行えるものが必要である。

ただ,上記の結論もプロセスによっては応 用できないものもあり,高温の蓄熱方法, 他のエネルギーとのハイブリッド形式も当 然検討してゆかねばならない。

現在まだ太陽炉の研究がシステムとして の炉心部の設計を具体的に行うまで到って いないが、今後、この方面の研究が太陽炉 利用の実現への一つのキーポイントとなる と思われる。

図 4.13

4.5 太陽炉の保守

4.5.1 まえがき

装置の保守要領とか項目といったものは,装置固有のものという感が強い。即ち、構成機器の材質,ヘリオスタットの駆動動力源,太陽追尾の方式,等々の違いによって異なってくるものと考えられる。

既に、大小とりまぜて世界で160 基ほどの太陽炉が建設されているが、立地条件から見ると、日照条件の良い 砂漠、水蒸気による吸収の少ない山岳地帯などが主体で、材料の耐候性からみた環境としても良いところが多いよ うである。しかし、太陽炉の保守という点については、装置固有のものという感じからかあまり報告されていない。 太陽炉特有のものとしては炉心構造に関するものと考えられるが、用途によって異なることから、ここでは極く一 般的なヘリオスタット式太陽炉の保守について述べるにとどめた。

4.5.2 太陽炉の構成機器と保守

ヘリオスタット式太陽炉において、太陽精追尾に、光学的太陽検出装置を使い、暴走防止とか、間欠運転などの 粗追尾にプログラム追尾装置を使うのが最も理想的な形式と考えられるが太陽熱発電ヘリオスタットのように、追 尾精度の太陽炉程高くないものもある。今一般的な方式の太陽炉の機器構成はほぼ表4.7のようである。

太陽炉の機器構成はヘリオスタット,パラボラ鏡,炉心構造から成っており,先ず第一に考えられるのは反射面の保守であろう。

反射面の保守

ヘリオスタット式太陽炉の場合,反射が2回,裏面鏡の場合さらに透過が2回加わるわけで,反射面を常に最 高の状態に保持することが大きな課題である。

一般的には名工試とか東北大学科学計測研究所の例のように格納庫を有している場合は表面鏡としてやわらか い布などで汚れ(ほこり)を落す程度で長年にわたって高い反射率が維持されていると報告されている。名工試 の場合はヘリオスタットの平面鏡(表面鏡)は2年に1回蒸着をくりかえして反射面の維持を行っており、10 年そのまふに放置した場合でも11 %の反射率の低下を来たした程度とされ、パラボラ鏡(裏面鏡)は25年来 使用して時々清潔な布で拭う程度である。東北大では研磨,蒸着.コーテイング処理等の工場を所内に持ってい るためヘリオスタット平面鏡を薄いプラスチックでコーチングして3年程度反射面の保護を行っている。仏ビレ ネーCNRS太陽炉のように大型となり屋外にさらされたままの場合は裏面鏡として表面を水洗い,洗剤による 洗浄によって高反射率を維持することを考えるのが良いようである。ただし大口径パラボラの鏡面の清掃法につ いては良い案がないのが現状である。しかし、これについては太陽熱発電などでも同じように苦しんでいる問題 であり、その研究成果は相互に有効に活用できると考えられる。また1973年のパリにおける太陽エネルギー 国際会議の太陽炉のセツションでも、雹による鏡面の破損が話題になったが、通常2~3cm以下の氷塊での損傷 は殆んど問題とならないようである。

また,1定期間を経たら反射面を再蒸着しセグメントを取り換えることもできるが,この場合,曲面,平面の 再調整が容易になるようにセグメント支持構造の上で工夫がなされている。

海岸地帯が、太陽炉の立地に選ばれるようになると反射面を初め塩害から守るために、かなり頻繁な水洗いが 必要になるのではないか。即ち逆に云えば水洗いで反射率の低下を防げるような装置、材料の開発が必要かと考 えられる。

(2) その他の構成品の保守

反射面以外で太陽炉特有の保守が必要な機器としては、炉心部では非常に高いエネルギー密度であることから

炉心構造での冷却装置及び安全シャッタに特別な配慮が必要となろう。

更に,これは安全性と絡めて検討されねばならないが、炉心部のモニター装置としてどのようなものを設けな ければならないか、太陽炉の用途に応じて考えられねばならないであろう。

4.5.3 まとめ

大型太陽炉を保有しないわが国の現状で、その保守の検討を独自で行うことは容易でないが、名工試および東北 大の太陽炉の経験と仏ピレネーの1000kw 炉に関する情報をもとに簡単な検討を加えた。大型太陽炉の保守は太 陽熱発電プラントのそれと共通した問題を有するが、屋外に曝露した光学機器の保守には、それらの機器構成や材 質により大巾に変化があることは云うまでもない。さらに外部からの塵埃、降雨、降雹、凍結等に対する防御に加 えて、台風、地震等のような天災の問題も挙げられる。

これらの諸問題の対策の殆んどは機器構成と材料,コンポーネントの段階で対策を樹立しておかなくてはならないが,過去の経験に依存する場合が多く,全システムの総合された保守の問題として経験と知識の積み上げが必要であろう。

パ ラ ボ ラ 鏡	・パラボラ鏡
炉 心 構 造	• 炉 心
	・温度制御用シヤッタ
	•安全用シヤッタ
	・計測装置、制御装置など
ヘリオスタット	・ヘリオスタット
	• ヘリオスタット 駆動機構
	• ヘリオスタット角度検出装置
	• 安全装置,格納装置など
太陽検出装置	•光学的太陽検出装置
ヘリオスタット	 ・時刻装置
駆動制御装置	• プログラム制御装置
	• サーボ増幅装置
	 制御架など

表4.7 太陽炉の機器構成例

4.6 安 全 性

4.6.1 まえがき

太陽炉の安全性は次の二つの観点から論ずるのが適当と思われる。

1. 太陽炉施設自身の安全性

2. 太陽炉の施設員,付近住民,見学者の安全性

前者は太陽炉施設を如何に安全に守るか、に力点があり、後者は人間を如何に安全に守るかが主題である。 4.6.2 太陽炉施設自身の安全性

これは太陽炉施設を如何に破損から守るか、と言うことであって、気象、天変地異、動物や人間、環境条件、

運転等の点から考察する。

(1) 気象

a) 風。風でも強風,突風,台風等が危険である。これらについては立地選定時に過去の記録を調べ.また有 力な候補地については気象観測期間を設けるなどして,その土地の最大風速を知る事が望ましい。その最大風 速に対しても十分な強度を持つような構造としなくてはならない。特にパラボラ鏡における風圧増加にも十分 対策が必要であろう。十分な強度をもったシャッターをパラボラ鏡の前に設置するのも有効であろう。

また強い風による二次災害を防ぐため、太陽炉施設の周辺の土地には、風で飛散しやすいものの設置を規制 するなどの措置が必要である。ヘリオスタットにもカバーをつけるのが有効と思われる。

b) 雨。雨についても立地条件が多雨地域は除かれているから,直接的な被害はないと考えられる。しかし, 突発的な集中豪雨については,排水不良,雨じまい不良等による被害あるいは鉄砲水,地崩れ等の二次被害が 起きるおそれがある。これらについては,建設設計時に水質,土地の勾配,水はけに適した排水構造とするこ とと,建設後のまわりの樹木の保護,育成にも留意しなければならない。

c) 雪。パラボラ鏡はその前面のシャッターを閉め雪の侵入を防止する。ヘリオスタットについては鏡面を鉛 直とし、鏡面に雪の荷重がかからないよう留意する。もちろんカバーをかけて鏡を保護すべきである。

d) 雹。雹が降って来るのを予測するのはむずかしいが, 雲の状態が危しい時は鏡にシャッターやカバーをしておくか, それが間に合わない時には, ヘリオスタット鏡を鉛直あるいは雹の飛来方向に平行に移動し, 鏡の 破損を防ぐようにする。

e) 氷結。冬の最低気温に留意して立地選定し,また水が溜りにくい構造となるように設計しておく。また氷 結防止用加熱装置を準備しておくのも賢明な方法であろう。

f) 雷。落雷についても立地条件で多発地域は避けるのはもちろんであるが,随所に避雷針を設けて,落雷を 少くし,太陽炉施設に被害のないようにする。

(2) 天変地異

a) 地震,立地条件で地震帯を避けておくことは言うまでもないが,万一の地震に対しても耐震構造により十 分な強度をもつよう,太陽炉施設を設計する。鏡の支持方式も工夫して地震による応力がガラスにおよばない ように支持する。特にパラボラ鏡のガラスに力をかけて放物面を形成する場合には十分な注意が必要である。
b) 地盤沈下。地盤の強度については立地選定の際にボーリングをして調べ,岩盤に達するよう基礎工事を行 うことにより,太陽炉施設の地盤沈下による影響は避けられるであろう。しかし地盤沈下を人為的には生じさ せないよう,地下水の汲上げについては場所と量について細心の注意を要する。また地盤沈下は極めて徐々に 起るのが普通なので,相当進行して初めて気付くことが多いから,定期的に調べるのが望ましい。

c) 津波。津波については立地選定あたり,海岸に土地を選んだ場合,外洋に面しているか,内海に面しているか,海岸の地形はV字形か,海岸からの距離は,土地の高さは海抜何メートルか,といった点について注意して選べば,まず心配ないと言えよう。

(3) 周辺の環境

a)酸、アルカリ。周辺の工場あるいは、火山や温泉等から、酸あるいはアルカリが飛散してくると、太陽炉 のガラスおよび構造材が腐食される。これに対しては立地調査の段階で避けると共に、工場等の人為的なもの については規制により、飛散しないように配慮することが肝要である。 SOx, NOx等も雨等の水分と結 合して酸となるので、排出を規制すべきである。NOxについては自動車からの排出もあるので、近くに交通量の 多い道路のあるところは避けるべきであろう。

b) 腐食。酸,アルカリ,SOx,NOx等に注意していても,構造材の錆等による腐食は避けられない。これは設計時に雨水等の溜りにくい構造としておき,さらに定期的な点検と,塗装で防ぐべきである。

c) 水滴,油滴。いずれも鏡面を曇らせるので避けなければならない。人為的な発生源は規制により発生しな くできる。滝,海岸等からの水滴は立地選定の際,距離や風向を十分考裏して,被害のおよばない位置に太陽 炉施設を建設するようにすればよい。

(4) 動物および人

a) 虫,鳥,獣。これらが衝突して,鏡面を汚染したり,破損したり,光学系に入って太陽炉の集光効率を下 げたりするおそれがある。その土地に現われるこれらの動物の種類と性態を調べ,それに合わせた対策を講ず る必要がある。誘蛾灯,防虫灯,アセチレン銃,罠,囮,光線反射テーブ,天敵あるいはその模型,案山子, フエロモン等により撃退あるいは捕獲する。

b) 作業ミス。パラボラ鏡の内部で作業する場合には、工具類はすべて腰バンドにひもで結び、誤って手を放しても落下して、パラボラ鏡を破損することのないようにする。

c) いたずら, 付近の学校を通じて児童に太陽炉の重要性を十分PRしておく。また, 塀あるいはフェンスで 自由に立入りできないようにする。塀やフェンスの位置も, 投石やパチンコ等では鏡にまで石が届かぬだけの 距離をとっておくのが望ましい。

(5) その他。断水が起っても、炉心の溶断あるいは火災が発生したりすることのないよう、水の補助タンクある いは緊急冷却装置を設置する必要がある。

4.6.3 太陽炉施設員,付近住民,見学者の安全性

これは太陽炉施設により人間の安全が損なわれないようにするにはどうすればよいか,ということであって,火 傷と火災危険作業,暴走,停電等に分けて考える。

(1) 火傷,火災

a) ヘリオスタット。二つ以上のヘリオスタットからの反射光が1点に集まると直射光と合せて,数倍以上の 強い光になり火傷あるいは発火の原因となるおそれがある。そこでヘリオスタットの光が交わらないようヘリ オセタットを制御する。こうすることにより直射太陽光の2倍以上の光線はどこにもあたらなくなり,火傷や 火災の心配はなくなる。

b) パラボラ鏡。パラボラ鏡の内部に人が入っている時には、パラボラ鏡の前面にあるシャッターが開かない よう、インターロック機構を設ける。もしシャッターを開けた状態でパラボラ鏡内に入る必要のある時には、 ヘリオスタットにカバーをかけないと入れないようなインターロック機構をつけておく。このようにしてパラ ボラ鏡内の人の火傷を防ぐ。

c) 炉心。炉心部の構造物には感温ベイントを塗っておき,そのベイントの色により構造物の温度がわかるようにしておく。これにより作業者の火傷が防げる。

(2) 危険作業

a) パラボラ鏡。パラボラ鏡内の作業は高所作業になるので,必ず複数人のグループで作業し,そのうち少く とも1人は監督あるいは介助にあたり,危険のないようにする。高所作業には必らず命綱を使用し,転落事故 のないようにする。

b) ヘリオスタット。ヘリオスタットの駆動に際しては、近くにいる作業者がはさみとまれることのないよう

ヘリオスタットに障害物検知器をつけるとか、作業者が予じめ、駆動回路の電流を切ることが出来るようなス イッチをつけておく。 また駆動に先立ってブザー等で駆動することを警告するようにする。

(3) 暴走。ヘリオスタットの制御を行う必要がある。太陽光センサーにより最大光度の方向にヘリオスタットを 向けるのでは、一時的に雲などにより暴走を起こす。従って季節および時刻にしたがって粗制御することに より、暴走の程度を少くすることが可能であろう。

また制御系が故障した場合には自動的にヘリオスタット鏡にカバーがかかるフェイルセイフ機材を採用する のが望ましい。

(4) その他

a) 停電。停電に対しては自家発電機を備えていて、実験が継続できることが望ましい。それが無理でも最低限、炉心の溶断、火災、暴走等を防止するためのフエイルセイフ機構を運転できるだけの容量をもった電池等の設置が必要である。

b) 音。パラボラ鏡は音を集束させる力があるから,近くに飛行機の航路のような強い音源がある場合には, 炉心近くに入る時には耳栓をしておく必要があるかも知れない。

c) 光の反射。ヘリオスタット鏡およびパラボラ鏡による光が,作業者および見学者の目を眩まし,あるいは 眼底の火傷を引き起すことのないよう,サングラスの着用が必要である。

4.6.4 まとめ

以上大型太陽炉の安全性について想定し得る諸要素について検討したが、仏ピレネーの50 kw 太陽炉(仏陸軍 所属)においてはパラボラ鏡前面の試料室建物に火災を起した経験があり、また1000kw 炉ではパラボラとヘリ オスタットの中間の芝生を焦がしたような事故も聞いている。太陽炉のみならず太陽エネルギー機器で高い集光比 を有するものでは、特に安全性について留意する必要があり、かつ肉眼で集光束は観察しがたい性格上、他の加熱 あるいは熱処理施設と異った安全性への配慮が必要である。特に炉心部は数千度の高温に曝されることがあるため 作業者の安全は三重、四重にもチェックされなければならない。中でも眼の保護は常に留意すべき点である。

4.7 公 害

太陽炉による公害の問題を考えるには,建設前,建設中,完成後(使用中),取壊中,取壊後に分けて考えるのが 便利である。

4.7.1 建設前

a) 人文調査

建設前にその土地に史跡,遺跡,墓地等が含まれていないかを調べておくのはもちろんであるが,もし建設工 事の途中でそれらが発見された場合に工事を中止するか,続けるかについても,事前に地元住民,教育委員会, 文化庁等と協議しておくべきであろう。こうすることにより,工事が中断したまま放置され,景観が破壊され, 付近の住民が地すべり等に脅かされるという,工事公害が回避できる。

b) 地質調査

太陽炉を建設したあとで,地盤沈下が起ったとしても,それが太陽炉の建設が原因なのかどうかは定かではない。そこで建設の前に地盤の変動を調査しておく必要がある。

地質調査,土壊の成分と汚染,地下水の水位や水質についても建設前のデータの蓄積が必要である。地下水を 冷却等に使う場合はこの調査は特に重要である。 c) 気象調査

建設前に、風の方向や強さ、日照、気温、湿度等の気象データを測定しておく必要がある。

d)生態調査

建設前に付近一帯の植物の種類と分布、虫、鳥、獣等の種類とその生態を調べておく必要がある。

e)生活環境調査

建設前に付近の騒音レベル,空気の成分,廃棄物の量,交通量 日照量等の生活環境データを集収しておく必要がある。

f)景観調査

太陽炉がその土地の景観に悪い影響を与えないか,住民に不安感,圧迫感を与えないかといった点についても 建設前に住民のコンセンサスを得ておく必要がある。これは多分に主観的なことなので難しいことではあるが, 建築デザイン上,周囲と調和する,形と色を決めるべきである。

以上a) ~f) 項のデータをもとに,後刻公害が発生した場合その程度を正確に知ることが可能である。 4.7.2 建 設 中

a) 交通安全

建設用トラックによる交通事故および交通渋帯が発生しないよう,建設用道路を作るなり,一般道路を使う場合でも児童の登校・下校時は避けるなどの配慮が望ましい。またトラックによる騒音,振動,排気ガスに関して も住民に迷惑のかからないような輸送コースを選ぶ必要がある。

b) 山崩れ防止

用地内の木材の伐採,土地の整地などによる、土砂の流出、砂塵の飛散、地すべり、山崩れなどが生じないよう、工法、工期、予防対策等十分に留意すべきである。

c) 建設用員

建設中は建設現場に飯場等が立ち、付近の住民等に風紀上の心配を与えないよう,建設用員の秩序を保つよう 建設会社の管理がなされねばならない。

4.7.3 完成後

a) 暴 走

ヘリオスタットの暴走は太陽光センサーの故障,制御系の故障,停電,操作ミス,凍結,夾雑物,錆つき等に より起るおそれがあるがこのような場合でも付近の住民の家屋,田畑,山林等に何ら被害をおよぼさぬよう,塀 などの設置が望ましい。

b)試料

太陽炉の実験で使用する試料が,事故で飛散し,付近に公害を出さぬよう,危険な物質を扱う場合には細心の 注意をする必要がある。また,万一そのような事故が起った場合でも何が,どれだけ飛散し,人体への影響はど うか,どう除去すればよいか等について,付近住民はじめ関係筋に対し,十分かつ迅速な通報が不可欠である。 c)廃 材

太陽炉からの実験資材その他の廃材,特に鏡の破片等の危険なものについては,その廃棄法を事前に地元関係 者と協議した方法にのっとって行い,作業員の怪我と廃棄物公害の発生を防止するようにする。

d) 水処理

太陽炉の冷却水、洗滌水、実験用水、およば太陽炉施設での生活排水は、できれば施設内で処理し、再利用あ

あるいは放流するものとし、水質汚濁公害を出さぬようにする。水源を地下水に頼る場合は、地盤沈下にも注意 する。又水処理によって悪臭を発生させることがないよう注意する。

e) 大気汚染

太陽炉が大気汚染をひきおこすのはb)の試料の飛散以外には考えにくいが、冷却熱、冷却水の湿気が十分拡 散するよう配慮する必要がある。

f) 観光公害

太陽炉が完成した暁には、観光客がどっと押し寄せることが予想される。この観光客が太陽炉施設員および付近住民に観光公害を生じないよう、あらかじめ対策を講じておく必要がある。

観光客は原子力研究所,宇宙ロケット発射基地等への見学者と同じ階層と考えられるので,それらの施設にお ける見学者への応対法が参考になるだろう。

太陽炉が稼動中の見学は危険であり,また作業の邪魔にもなるので,別に見学者用施設を作り,その内にモデ ル太陽炉を展示し,見学者の便をはかるのが望ましい。

観光バスが支障なく運行出来るよう,舗装道路を整備すべきである。駐車場,便所,ゴミ箱等の管理は太陽炉 施設または自治体が責任をもって行い,付近の住民との間にトラブルが発生しないように努めなければならない。 太陽炉施設は広大な土地に設置されるので,見学コースも長距離になるから,バスで見学できるようなコース を作ることも考えられよう。

4.7.4 取壊中および取壊後

太陽炉自体の寿命は相当長いと予想されるが,天文台とか地震観測所のように付近の開発が進み,夜の明るさとか,交通による振動で役に立たなくなると同じく,太陽炉も,日光をさえぎったり,構造物を腐食させるようなものが,付近に多くなると操業停止におい込まれるおそれがある。

博物館として保存することも考えられるが、ガラスが危険なので取り壊すのが妥当であろう。

取壊し中は,騒音,塵埃,水質汚濁が発生しないように十分注意し,また廃棄物の運搬とその処理についても, 細心の注意を払わなければならない。特に大量に発生するガラス層は取扱いに注意を要する。取壊し後は跡地利用 計画に応じて,景観の回復がはかられるべきである。再利用が立たない前に取壊したような場合でも,再利用まで に,浮浪者や不法侵入者が住みつかないよう,十分に管理する必要がある。

4.8 太陽炉によるカーボランダムの製造

4.8.1 まえがき

カーボランダム(炭化珪素,SiC)は周知のごとくE.G.Acheson が1891 年に合成してからその後86 年に至る生きの長い商品である。

現在,工業的には黒色炭化珪素,緑色炭化珪素として製造販売され,その用途は砥石原料が大部分であるが煉瓦 抵抗体(発熱体)としての用途も次第に増加しさらに避雷器,ボイラー用,製鉄用の特殊セメントとしての特殊用 途も開拓されている。また,最近における懸案は,純度の高い単結晶をつくることで,半導体としての優秀な性能 が予想されているものである。

しかしながら,現在の製造法では,純度の高い単結晶をつくることは難しい状態であり,ここに太陽炉の利用の 可能性を考察することとした。したがって,先ず,現在のカーボランダムの製造法について検討し,次いで太陽炉 での可能性を見出し,出来得れば,単結晶の育成とその物性の研究まで進めることができればカーボランダム工業
への寄与を期待することができよう。

4.8.2 カーボランダムの製造法

Acheson の初めた頃とその原理は殆んど変わりなく、炉の構造、製品の質、原単位においては大いに進歩している。

①原料

主原料は珪石と炭材であるが、添加剤として鋸屑、食塩等を用いることがある。

珪石:98~99.5 %程度の品位が要求される(とくにGC用には良質のもの)。普通,品質のよい珪石ある いは珪砂が使用され,不純物として混入する Fe_2O_3 , $A\ell_2O_3$, CaO, MgO等はできるだけ少ない方が良い。又サイ ズは10~1%程度である。

炭材:炭材ももちろん不純物の少ないものが良く,無煙炭。石油コークス、ときにはピッチコークスなどの灰 分の少いものが必要である。サイズは微粉を除いた数%程度である。

鋸屑:鋸屑として主にチップを原料中に混合する。これは電炉中で加熱されて炭化すると共に、これによって 装入原料に空隙をつくり大量に発生する反応ガス(CO)の脱出を容易にするためである。

食塩:原料中の不純物である $\operatorname{Fe}_2 \operatorname{O}_3$ や $\operatorname{A}\ell_2 \operatorname{O}_3$ を食塩蒸気の存在で還元し $\operatorname{Fe}{\operatorname{C}\ell}_3$, $\operatorname{A}\ell \operatorname{C}\ell_3$ として蒸発除去 するために原料チャージの際に混合する。原料の品質がよければこの必要はない。

② 配 合

原料配合は反応方程式に示されるより若干炭材を多くする。

 $SiO_2 + 3C \rightarrow SiC + 2CO$

60 36 40 56

配合の一例

食	坘	$2 \sim 5''$
鋸	屑	$4 \sim 10 ''$
コーク	ス	35 ~ 36″
珪	砂	52 ~ 56kg

③ 電気炉

電気炉は下図のごとく,黒鉛化炉に似た長い炉で両端の固定壁を通して黒鉛電極を設け, 側壁の床面以上は空 積煉瓦又は側壁ブロックを用いて金枠で固定している。また炉底は耐火度の高い煉瓦を使用する。

黒鉛化炉と同じく二次回路が長くインダクションループが大きいため、回路のリアクタンスが大きく、Power Factor が低い。

電気炉の容量は一般に 1,000~3,000KW であ って,変圧器の二次側電圧は 200~300 Vよ り60~70 Vまで,炉内抵抗の変化に応じて変 えられるようにしている。

電気炉寸法の一例





炉の	容 <u>量</u> (KW)	750	2,0 0 0	3,000
ur 14 ++	径(m)	0.5	0.6	
<u></u> 抵	長 (m)	5	6	
ECLAR	巾 (m)	2.2	2.5	3.0
炉の大きさ	長 (m)	7	16	18

④ 操 丵

配合原料を炉底より適当な高さまで積み、中央に若干のくぼみをつけ、ここに黒鉛粉をつめ電極と接触させ、 通電時に電流分布が一様になるようにしておく,さらにその上に配合原料をチャージして通電する。通電後しば らくは抵抗芯の温度が低く抵抗が大きいため200~300Vの電圧をかけ、温度上昇とともに電圧を下げ電流を増 加しながら操業を続ける。一般に負荷曲線を持っておりこれに近づけながらチャージし通電を続ける(16~42 時間)。反応が終り(ガスの出が少くなる)にくれば停電し、冷却し、取出す(通電と同じ位時間を要する。) 取出すには側壁を取り去り冷却を促進させながら抵抗芯の周囲にできたカーボランダムを取り出す。カーボラン ダムは樹枝状で放射状に発達しているので未反応原料および抵抗芯(共に再使用)と分離採取する。

採取したカーボランダムは破砕し,篩にかけ,種々の粒度の製品とする。なお必要に応じて酸洗いをして酸化 鉄. アルミナ等を除いている。

生成物中の結晶製品の収率は80~90%であり、原単位は10,000~13,000kWH, 硅石1.5~1.0t, 炭材 1.1~1.2t と言われている。

⑤ 結晶の成長法

一般にカーボランダムの結晶成長をよくするためには、電気炉のコアー(抵抗芯)に電力供給を始めると、コ アーの周辺の原料が加熱され温度が次第に上昇し反応温度(約1,700℃)になると、まず β -SiC が生成す る。さらに温度が上がると次第に反応層が外方に拡がり、且つeta – Si C はいろいろの種類のlpha – Si C に変化 する(約2,300℃)。コアーの温度がさらに上昇するとα-SiC は分解を始め(約2,600℃)SiC の蒸気と ともに Si 蒸気を出し分解黒鉛が残留する。

従ってコアーに一定電力を供給することによって過熱をさけ反応層を拡大するように設計並びに作業を遂行す ることが良質カーボランダムの結晶成長のポイントである。

4.8.3 カーボランダムの生成

Si C 製造炉におけるSi C 生成状態をモデル 化すると右図(図4.15)のごとくになる。

すなわち黒鉛の芯を中心にして分解黒鉛, α結 晶, β結晶, 未反応層に分けられ, α-SiC 層 は芯より放射状に樹枝状晶として発達する。これ ら結晶の軸方向が炉断面の半径方向に向っている。 もちろん内側のSiC が先にできた結晶で、結晶 は外方に向って成長するのである。もし少し大き なコークス粒が結晶生成の途中に存在すると, Si C の結晶はコークス粒につきささったように 図 4.15 カーボランダム炉モデル断面図



になり、その境に密な結晶を生ずる。そしてコークマ粒の外方向にはちょうど蔭のように空隙が生ずる。もし何か の理由で大きな空隙があるとそこには自由に発達した大きな結晶が見られ、 α – Si C の外縁には β – Si C の微 結晶が存在する。また α – Si C 結晶の表面には転位像が見られ、 β – Si C →気相→ α – Si C により発達した ことが認められている。

つぎに、 β -SiC は結晶系としては立方晶系に属しているが、 α -SiC のそれは稠密六法格子の構造をなし その積み重なり方によって、 α I(32)(15Rともいう)、 α II(6H) α III(4H)など、その数300以上 にも及ぶと言われている。またいったん結晶した変態は他の変態に再び変わらないとも言われており、変態につい ての諸説が官、学界において大いに論議されている。

今,仮に β -SiCから単一な α -SiC(例えば4Hのみ)が作れるならば,変態論議も解決するばかりでなく,物性研究も進んで,新しいカーボランダムの利用価値も生まれることは間違いないと思われる。

4.8.4 太陽炉によるカーボランダムの製造

既に記述したとおり、カーボランダムの生成は、珪石と炭材とが約1,700℃で反応し、まず β -SiCができる。次いで 2,300℃附近で α -SiCに変化することから、われわれはその第一段階である β -SiCを太陽炉で作ることを提唱したい。 幸い、太陽炉専門委員会第2小委員会でのシリコンの製造研究の課程において

SiO₂+XC → Si + yCOの反応中, C量をX=1~2Cとした場合 X=1.5C以下ではSi のみ, 又X=1.5C以上ではSi のほか β -Si C を生成することが報告されている。従ってC量をSi C のできるX= 3位まで増加すればSi を含まないでSi C のみつくることも差程困難なことではない。しかし、その場合、すべ てが β -Si Cであるか (α -Si Cを含まない)は十分検討を要することと言えよう。

もしβ-Si C だけが得られるならば、われわれは次の手段として各種のα-Si C についての研究に入り得る ことは明白である。現在のα-Si C は300種を超えるいろいろの型の混合物であるため、その性質もふくそう している。そのため現状では一定のα-Si C (例えば4 Hのみ)を作る方法が各界から望まれている。太陽炉に よるンリコンカーバイトの生成はこの希望に答え得る研究のテーマとなり得るものと思われるので是非実現したい ものである。

幸い,太陽炉は2,300℃を超える高温と急熱,急冷は勿論,いろいろの雰囲気の実験が可能であるため, β – Si Cの研究にはもっとも都合のよいものと考えられる。

参考文献

電熱化学工業(工業化学全書16)

4.9 高温ガス反応への利用

4.9.1 まえがき

昨年度太陽炉を利用して天然ガスよりアセチレンを製造する方法について略述した。その際,天然ガスの火炎分 解用の酸素・スチーム混合ガスを濃縮された太陽光により高温に加熱すること,加熱に当って加熱むらがなく,か つ伝熱性のすぐれた流動層を用いること,しかも太陽光の照射の変化に対して,遅滞なく別熱源にスイッチされる ことを折込んだプロセスを提案した。しかし本プロセスは加圧あるいは減圧下で運転することは,太陽光の取入窓 ロがガラスであることから困難であると考えられる。

一般に高温化学反応を伴うプロセスは加圧下で行うことが有利である。たとえば、炭化水素の部分燃焼ガス化、

あるいは水添ガス化 あるいは鉄鉱石の直接還元がある。炭化水素の熱分解によるオレフインの製造, Ni 触媒に よる炭化水素のスチームリフオーミング等も下流での昇圧の負担の軽減のため、加圧下で運転されている。

太陽炉と高温高圧反応装置との組合せは反応装置へ直接太陽光を照射すると言う点では不可能であろう。しかし 反応物質あるいは適当な熱媒等を伝熱管により、間接的に加熱して管内で反応させるか、下流の反応装置へ送るこ とは管の耐熱性さえ許せば可能である。

ここでは伝熱管による濃縮太陽光の吸収について略述したい。

4.9.2 加熱方式

管を加熱する方式としては大きく分けて,次の3つがある。

a) 管に直接太陽光を照射する。

伝熱が直接的であることは抵抗の少ないことを意味し、好ましいことであるが、他方、放熱をできるだけ少く するよう太陽光の取入れ口を小さくすれば、熱流束が高まり、局所過熱を生じ、反対に異状な熱流束をやわらげ 局所過熱を少なくすれば放熱流が増大する等高温になればなる程選択の幅は小さくなる。

b) 管を流動層あるいは溶融金属浴に浸漬し層あるいは浴に太陽光を照射する。

これは太陽光取入口を小さくできること,層あるいは浴の攪拌が行なわれれば,異常に大きい熱流束,局所加 熱が大幅に緩和されるので前項の欠点はほぼ解消される。しかし,攪拌の問題,攪拌用ガスに伴って出る熱損失 等が存在する。

c) 流動層に太陽光を照射し, その層を通過させ, 加熱したガスと管とを接触させる。これは太陽光取入口を小 さくし, 放熱を抑制したり, 局所過熱の防止には効果があるが, 伝熱がかなり間接的で, 熱抵抗が大きく, 伝熱 速度を低下させる欠点がある。

以上3方式を比較すれば, a) b) は新しい型式の管式加熱炉が要求されるが, c) は太陽光照射流動層の他 は従来の加熱炉が利用できる。他の熱源とのスイッチについては a) が困難である他は特に問題はない。

4.9.3 高温高圧反応プロセスへの太陽炉の適用例

前節のa) は高温高圧反応プロセスへの適用にかなり無理があるので b) および c) についてそれぞれ1 つず つ具体例を挙げて概説したい。

a)ナフサの熱分解によるオレフインの製造プロセスへの適用例

ナフサの熱分解炉は図4.16に示すように一般にヘヤビン状に数回屈曲した反応管(コイルと称する)を炉の 側壁にヘヤビンを形成する面が平行になるよう配置されており、両面から多数のバーナで加熱され、反応管の一 端からナフサとスチームの混合ガスが導入され、他端まで1秒以下で通過し、800℃ 前後に加熱され、分解され エチレン等のオレフイン、芳香族その他を生ずるように設計されている。

反応管の表面は運転開始直後は最高950℃ 程度であるが、時間の経過と共にコーキングが進行し、次第に上昇し、1,100℃にも達する。しかも従来の炉では反応管は炎の輻射の蔭あるいは直射部、炎からの遠近によって 温度むらを生じており、反応管の耐熱限界、クリープラプチャ寿命等を勘案して、注意深い運転が必要である。

これに太陽炉を適用する場合は、炉を流動層あるいは金属浴として、その中に反応管を浸着することが好ましい。その際攪拌のため炉底よりガスを少量吹込むこと、炉をコンパクトにするよう、コイルを平行に複数配列することが考えられる(図4.17)。これは従来炉と違って、層内あるいは浴内は輻射でなく、対流伝熱が支配的であり、伝熱促進のためには熱媒の混合が重要であり、輻射のように熱源と伝熱面との幾何学的位置関係があまり重要でなくなるからである。



図4.16 従来のナフサ熱分解炉例

昨年度も触れたように、太陽光は地表では昼間しか利用できない。また昼間でも雲があれば同様である。この ことを考慮して、本プロセスでも太陽光の照射量の変化に即応して流動層、金属浴の熱媒に熱を補給するシステ ムを組込む必要がある。

b) ナフサのスチームリフォーミングによる水素製造プロセスへの適用例

ナフサのスチームリフォーミング炉は図4.18 に示すように一般に約10m長の鉛直反応管を一列あるいは複 数列直線状に配列されており、両側から多数のバーナーで加熱され、反応管一本一本の上端からナフサとスチー ムの混合ガスが導入され、下端で800℃ 前後になるよう加熱され、改質されて、H₂、CO CO₂、CH₄が 生成するようになっている。

圧力は単にH₂をつくるか,あとアンモニヤ,メタノール製造工程に使うか,すなわちCH₄をどれだけ残してよいかによって異なるが,耐熱性,クリーブラブチャ寿命の許す範囲内でできるだけ高くすることが,後の圧縮工程の動力低減の上から望ましい。

これに太陽炉を適用する場合、10m前後の反応管を鉛直に配置するという制約から、前項のように流動層あ



図 4.17 太陽炉適用のナフサ熱分解炉例







図4.19 太陽炉適用のナフサスチーム リフオーミング炉

るいは金属浴に浸漬するのはせいぜい下方の2~3m程度,それ以上は別の太陽炉で加熱されたガスを反応管に 接触させるのがよいと考えられる(図4.19)。言うなれば,従来のスチームリフオーミング炉と補助熱源とし てのバーナーを側壁に設置すればほとんど変らないが、ガス量制御に問題がある。

4.9.4 まとめ

太陽炉を高温高圧反応ブロセスに適用するための検討を行ってきたが、検討不足もあって大きな飛躍はなく、太 陽光を摂取し、それを伝熱管壁を通して、反応物質に熱として伝える装置の構造が僅かに変化するにとどまった。 太陽と言う農業,水産業に類する第一次産業に適したエネルギー源を、太陽光照射量の変化を乗り超えた近代的な工 業に適用しようとするのであるから、またそれを高温レベルに利用しているのであるから困難なのは当然であろう。 当面化石燃料,核燃料等の再生不能のエネルギー源をできるだけ食いのばして行くことを極力実施することに重点 をおくことが重要である。その意味では反応器へ入る原料の予熱にはかなり使えそうである。たとえば、炭化水素 の部分燃焼ガス化のためのO₂,スチームの予熱,高炉による製鉄のための空気の予熱,鉄鉱石直接還元用末反応 還元ガスの循環利用に当っての予熱,炭火水素の熱分解のための熱媒としてのスチームの加熱等がある。

今後の主たる研究課題を挙げれば

a 従来プロセス,装置に対して競争力を確保できる太陽炉の開発

b 高温,高圧化のための耐熱,耐圧材料の開発(単に反応管にとどまらず,弁,接手,ボンブ,ブロワ等まで)

e 高温で安定で取扱い容易な熱媒の開発

d 粉粒体の高圧部への供給,それからの排出のため連続定量装置の開発(まだ信頼性に欠け,ロスが多い) がある。

参考文献

1)	佐藤ら	:	石油学会誌	1 5.	825(1962)
2)	山崎ら	:	石油学会誌	1 5.	831(1962)

4.10 蓄熱材料

4.10.1 まえがき

太陽エネルギーを熱源として利用する場合,天候の変化によるエネルギー量の変化が大きく,安定な熱源として 問題であることはよく知られている。この欠点を補うため,優れた蓄熱材料が不可欠であり,現に,地道な研究が 続けられている。従来から研究されてきた蓄熱材料は,顕熱を利用したものと,潜熱を利用したものに分類するこ とができるが,これらの材料を用いた場合,容器の断熱が必要となる。特に長時間の蓄熱を考えたときは容器から 外部に逃げる熱損失が重要な問題になる。さらに従来の材料では得られなかった,単位体積あたりの蓄熱量の大き な材料の開発が望まれている。そこで,これらの欠点,あるいは要求に基づいて,新しい蓄熱材料が着目され,研 究が始められた。この蓄熱材料は,化学反応に伴う熱の吸収,放出を利用するもので,次の2種類に分類すること ができる。その一つは,高温で化合物を分解し,熱を吸収させた後,低温で再び結合させ熱を放出する化学変化の 過程で,触媒を用いるもので,分解によって生成した物質を同じ容器内で混合しておくことができる。今一つは, 触媒を用いないもので,高温で分解したとき,生成物を分離して貯蔵するものである。蓄熱材料の使用温度は,冷 暖房に使用する200℃ 以下の温度と,太陽熱発電に用いる500℃ 1000℃に分けることができるが,ここでは 後者に関する.化学反応利用蓄熱材料についての調査結果を報告する。

-105-

4.1 0.2 化学反応の選択基準

過去,多くの研究者によって研究されて来た数多くの化学反応の中から,化学変化の温度範囲が500℃~1.000 ℃にあり,化学反応に伴う熱変化が大きい等,蓄熱材料として適した反応を選択しなければならない。そこで,化 学反応利用蓄熱材料について述べる前に,化学反応の選択基準を以下に述べる。

① 熱吸収反応は1000℃以下であること。

② 熱放出反応は500℃ より大きいこと。

- これらの条件を満足する化学反応を選択するために、化学反応の平衡定数Kが1であるときの温度T^{*}を評価す るのが便利である。

$$500\,\text{°C} \ < \ T^* \ = \ \frac{\bigtriangleup H}{\bigtriangleup S} \ (\ \bigtriangleup Cp \ = 0 \) \ < \ 1000\,\text{°C}$$

③ 大きなエンタルピーを有すること

④ 熱吸収反応によって生じた生成物のモル容積(V)が小さいこと。

③④の条件を評価するには△H/V を調べるのが便利である。この値が出来るだけ大きいことが望ましい。

⑤ 反応は完全に可逆であること。

⑥ 反応速度が十分早いこと。

⑦ 触媒を用いない反応の場合,熱分解によって生じた生成物を分離することが可能であること。

4.1 0.3 触媒利用化学反応

化学反応が遅い場合には、触媒を用いて、反応速度を大きくする必要があるが、その代り、生成物を分離する操作を必要としない。この方法の代表的なものはSO₃ ($\mathcal{G} \hookrightarrow SO_2(\mathcal{G}) + O_2(\mathcal{G})$ を利用した蓄熱であるが、表4.9にこの反応を含めて、今までに報告されているの反応を示す。

表 4.9

化 学 反 応	$\Delta H(keal)$	$ \bigtriangleup S(\underbrace{ \begin{array}{c} cal \\ deg \end{array} })$	$T \xrightarrow{A \cap H(o)} S$	$\frac{\Delta H}{V} \left(\frac{\text{kcal}}{\ell} \right)$	1 備 考
$CH_4^{(\mathcal{G})} + H_2O^{(\mathcal{G})} \simeq CO^{(\mathcal{G})} + 3H_2^{(\mathcal{G})}$	49	51	960	50	100 気圧 2 5℃
$\operatorname{CH}_4(\mathcal{G}) + \operatorname{CO}_2(\mathcal{G}) \hookrightarrow 2\operatorname{CO}^{(\mathcal{G})} + 2\operatorname{H}_2(\mathcal{G})$	59	6 1.5	960	60	10.13法任 0.13
$\mathrm{SO}_3^{(\mathcal{G})} \cong \mathrm{SO}_2^{(\mathcal{G})} + \frac{1}{2} \mathrm{O}_2^{(\mathcal{G})}$	2 3.5	2 2.7	1,040	110	SU214版体, U214 100 気圧 25℃の
$CH_3OH^{(\mathcal{G})} \leq 2H_2^{(\mathcal{G})} + CO^{(\mathcal{G})}$	22	53	420	42	カス 300 気圧 327 ℃

この表から分かるようにSO3分解反応は蓄熱効果が大きい。触媒として白金又は V_2O_5 が用いられる。

4.1 0.4 触媒を利用しない化学反応

化学反応速度が早く、触媒を必要としない場合には、熱を吸収して分解した生成物が共存していると、温度が降下するにつれて、生成物が反応し、再結合によって熱を放出するので、蓄熱量が減少する。これを避けるには分解によって生じた生成物をすぐに分離する必要がある。アンモニア塩の熱分解反応について評価した結果を表4.10に示す。この中ではNH4HSO4の分解反応が、他のアンモニア化合物に比べ、モルあたり約2倍の蓄熱量を有するので、大いに有望である。さらに、周期律表の1A、及び2Aの水酸化物について表4.11に、炭酸塩、硫酸塩、酸化物について、それぞれ表4.12~4.14に示す。

化学反応	<u>.</u>
$\mathrm{NH}_4\mathrm{HSO}_4^{(\ell)} \hookrightarrow \mathrm{NH}_3^{(\mathcal{T})} +$	$-H_{2}O + SO_{3}(9)$
$\mathrm{NH}_4\mathrm{F}^{(\mathrm{s})} \hookrightarrow \mathrm{NH}_3^{(9)} + \mathrm{HF}_3^{(9)}$	(9)
$\mathrm{NH}_4\mathrm{CI}^{(\mathrm{s})} \hookrightarrow \mathrm{NH}_3^{(9)} + \mathrm{H}_3^{(9)}$	$\mathrm{ICI}^{(\mathcal{G})}$
$\mathrm{NH}_4\mathrm{B}_r^{(\mathrm{s})} \hookrightarrow \mathrm{NH}_3^{(\mathcal{G})} + \mathrm{H}_3^{(\mathcal{G})}$	(B _r (9)
$\operatorname{NH}_4 \mathrm{I}^{(\mathrm{s})} \hookrightarrow \operatorname{NH}_3^{(\mathcal{G})} + \mathrm{HI}$	(9)

化学反応 $Mg(OH)_{2}^{(s)} \hookrightarrow MgO^{(s)} + H_{2}O^{(g)}$ $\operatorname{Ca}(\operatorname{OH})_{2}^{(\mathbf{s})} \hookrightarrow \operatorname{CaO}^{(\mathbf{s})} + \operatorname{H}_{2}O^{(\mathbf{s})}$ $\operatorname{Sr}(\operatorname{OH})_{2}^{(\mathfrak{G})} \hookrightarrow \operatorname{SrO}^{(\mathfrak{S})} + \operatorname{H}_{2}O^{(\mathfrak{G})}$ $\operatorname{Ba}(\operatorname{OH})_2^{(s)} \cong \operatorname{BaO}^{(s)} + \operatorname{H}_2^{O^{(g)}}$ Li $OH^{(\ell)} \hookrightarrow \frac{1}{2} \operatorname{Li}_2 O^{(\mathbf{S})} + \frac{1}{2} \operatorname{H}_2 O^{(\mathcal{S})}$ $\operatorname{NaOH}^{(\ell)} \stackrel{}{\hookrightarrow} \frac{1}{2} \operatorname{Na}_2 O^{(s)} + \frac{1}{2} \operatorname{H}_2 O^{(\mathfrak{I})}$ $\operatorname{KOH}^{\ell} \stackrel{}{\hookrightarrow} \frac{1}{2} \operatorname{K}_2 \mathcal{O}^{(\mathbf{s})} + \frac{1}{2} \operatorname{H}_2 \mathcal{O}^{(\mathbf{s})}$ $\mathbf{RbOH}^{(\ell)} \leftrightarrows \frac{1}{2} \mathbf{Rb}_2 \mathbf{O}^{(\mathbf{S})} + \frac{1}{2} \mathbf{H}_2 \mathbf{O}^{(\mathcal{G})}$ $\mathrm{CsOH}^{(2)} \hookrightarrow \frac{1}{2} \mathrm{CsO}^{(\mathrm{s})} + \frac{1}{2} \mathrm{H}_2 \mathrm{O}^{(\mathcal{G})}$

化学反応 $M g CO_3^{(s)} \Leftrightarrow M g O^{(s)} + CO_2^{(g)}$ $CaCO_3^{(s)} \Leftrightarrow CaO^{(s)} + CO_2^{(g)}$ $\operatorname{SrCO}_{3}^{(s)} \hookrightarrow \operatorname{SrO}^{(s)} + \operatorname{CO}_{2}^{(\mathfrak{F})}$ $B a CO_3^{(s)} \Leftrightarrow B a O^{(s)} + CO_2^{(s)}$ $L_{i_2}CO_3^{(s)} \leftrightarrows L_{i_2}O^{(s)} + CO_2^{(g)}$ $\operatorname{Na}_{2}\operatorname{CO}_{3}^{(s)} \leftrightarrows \operatorname{Na}_{2}O + \operatorname{CO}_{2}^{(g)}$ $K_2 CO_3^{(s)} \leq K_2 O^{(s)} + CO_2^{(g)}$ $\operatorname{Rb}_{2}\operatorname{CO}_{3}^{(s)} \leftrightarrows \operatorname{Rb}_{2}\operatorname{O}^{(s)} + \operatorname{CO}_{2}^{(g)}$ $C s_2 CO_3^{(s)} \Leftrightarrow C s_2 O^{(s)} + CO_2^{(g)}$

化学反応	
$MgSO_4^{(s)} \leq MgO^{(s)} +$	SO ₃ ⁽⁹⁾
$CaSO_4^{(s)} \leq CaO^{(s)} +$	$SO_{3}^{(g)}$
$\operatorname{SrSO}_{4}^{(s)} \Leftrightarrow \operatorname{SrO}^{(s)} +$	$SO_3^{(g)}$
$\operatorname{BaSO}_4^{(s)} \hookrightarrow \operatorname{BaO}^{(s)} +$	SO 3 ⁽⁹⁾
$Li_2SO_4^{(s)} \Leftrightarrow Li_2O^{(s)}$	+ $SO_{3}^{(g)}$
$\operatorname{Na}_{2}\operatorname{SO}_{4}^{(s)} \leftrightarrows \operatorname{Na}_{2}\operatorname{O}^{(s)}$	+ $SO_{3}^{(g)}$
$K_2 SO_4^{(s)} \Leftrightarrow K_2 O^{(s)} +$	$SO_3^{(\mathcal{P})}$
$\operatorname{Rb}_2 \operatorname{SO}_4^{(s)} \Leftrightarrow \operatorname{Rb}_2 \operatorname{O}^{(s)}$	$+SO_3^{(g)}$
$C s_2 SO_4^{(s)} \leq C s_2 O^{(s)}$	$+ SO_3^{(g)}$

$\Delta H(\text{keal})$	$\triangle S(\frac{cal}{deg})$	$T^* \xrightarrow{AH(k)} \overline{\Delta S}$	$\frac{\Delta H}{\overline{v}}(\frac{kcal}{l})$	備	考
8 0.4	1 0 8.9	740	740	液状で蓄熱する き△Hℓは 60	らこのと
3 5.1	7 0.3	499	512	$\triangle H\ell = 2$	1.6
4 2.1	6 8.0	618	570	$\triangle H = 3$	0
4 5.0	66	677	640	$\triangle H\ell = 3$	3

649

460

67

 $\triangle H\ell = 31$

	表	4.11					
∆ŀ	I(kca	1) - 4	$\triangle S(\frac{cal}{deg})$	$\mathbf{T}^{\mathbf{k}} = \frac{\Delta \mathbf{H}(\mathbf{k})}{\Delta \mathbf{S}}$	$\frac{\Delta H}{\overline{v}} \frac{kcal}{I}$	備	考
	19.4	l	3 6.5	531	v 330	H2Oは液状で とき△Hℓは 9	蓄熱この 0.6
	2 6.1		3 4.7	752	470	$\Delta H\ell = 1.6.$	4
	3 0.3	3	(35.6)	(852)	510	$\Delta H\ell = 2 0.$	6
	3 5.7	,	(35.6)	(1,000)	580	$\Delta H \ell = 2.6.$	0
	1 3.6	5	1 3.5	1,004	530	$\triangle H\ell = 8.$	7
	2 1.2	2	1 2.5	1,696	720	$\Delta H \ell \approx 1.6.$	3
	27.5		1 1.8	2,3 2 7	740	$\Delta H\ell = 21.$	6
	2 8.6	5	(12.6)	(2,270)	700	$\Delta H\ell = 2.3.$	7
	2 8.4		(12.6)	(2,254)	560	$\Delta H\ell = 2.3.$	5

表 4.12

表 4.10

4 3.5

∆H(kcal)	$\triangle S(\frac{cal}{deg})$	$\Gamma^* \underline{\Delta H(k)} \underline{\Delta}$	$\frac{\underline{W}}{\overline{V}} (\frac{\underline{kcal}}{I})$	備	考
28	4 1.8	670	560	CO2が液体	で蓄熱され 11=268
4 2.6	3 8.4	1,110	780	$\Delta H\ell = 4$	1.5
5 6.5	4 0.9	1,380	9 50	$\Delta H\ell = 5$	5.3
6 4.4	4 1.1	1,570	1,000	$\triangle H\ell = 6$	3.2
5 3.4	3 8.5	1,390	1,0 2 0	$\Delta H \ell = 5$	2.2
7 6.8	3 5.3	2,710	1,200	$\triangle H\ell = 7$	5.7
94.1	36.4	2,5 8 5	1,210	$\Delta H \ell = 9$	3.0
96.7	(36.7)	(2,634)	1,1 0 0	$\Delta H\ell = 9$	5.1
9 7.5	(36.7)	(2,655)	1,100	$\Delta H \ell = 9$	6.0

表 4.13

∆H(kcal)	$\triangle S(\frac{cal}{deg})$ T	$\stackrel{\underline{AH}(k)}{\Delta S}$	$\frac{H}{\overline{v}} (\frac{\text{kcal}}{\overline{I}})$	備	考
67.2	4 5.8	1,470	1,080	SO3が液体	て蓄熱した
96.2	4 4.8	2,1 4 5		場合 △Hℓ	=57.0
1 0 9.8	4 4.8	2,4 5 0	-		
1 2 3.5	4 6.5	2,6 6 0			
106	(42.9)	(2,470)	-		
1 3 7.1	4 2.9	3,1 9 0	_		
161.4	4 1.7	3,867			
167.2	(42.9)	(3,900)			
1 6 9.0	(42.9)	(3,940)			

化学反応	△H(kcal)	$\triangle S(\frac{cal}{deg})$	$T^{k} = \Delta H(k)$	$\frac{\Delta H}{\overline{M}}(\frac{\text{kcal}}{l})$	備
$\mathrm{MgO^{(S)}} \leftrightarrows \mathrm{Mg^{(G)}} + rac{1}{2} \mathrm{O_2^{(G)}}$	179.7	5 3.6	3,360	v	
$\operatorname{CaO}^{(s)} \leftrightarrows \operatorname{Ca}^{(\mathscr{G})} + \frac{1}{2} \operatorname{O}_2^{(\mathscr{G})}$	197.8	5 2.0	3,800		
$\mathrm{SrO}^{(\mathrm{S})} \leftrightarrows \mathrm{Sr}^{(\mathrm{S})} + \frac{1}{2} \mathrm{O}_{2}^{(\mathrm{S})}$	180.3	5 0.8	3,5 5 0		
$B a O^{(s)} \Leftrightarrow B a^{(\mathscr{P})} + \frac{1}{2} O_2^{(\mathscr{P})}$	174.3	4 8.4	3,600		
$\mathrm{Li}_{2}\mathrm{O}^{(\mathrm{s})} \iff 2\mathrm{Li}^{(\mathrm{g})} + \frac{1}{2}\mathrm{O}_{2}^{(\mathrm{g})}$	216.5	8 1.7	2,6 5 0		
$\operatorname{Na}_{2}O^{(s)} \leq 2\operatorname{Na}^{(\mathcal{G})} + \frac{1}{2}O_{2}^{(\mathcal{G})}$	151.4	8 0.5	1,880		
$K_2 O^{(s)} \leq 2K^{(g)} + \frac{1}{2} O_2^{(g)}$	1 2 9.9	7 8.6	1,652		
$\operatorname{Rb}_2 O^{(s)} \cong 2\operatorname{Rb}^{(\mathscr{G})} + \frac{1}{2} O_2^{(\mathscr{G})}$	1 1 9.9	(80.3)	(1,494)	—	
$C s_2 O^{(s)} \simeq 2C s^{(\mathscr{P})} + \frac{1}{2} O_2^{(\mathscr{P})}$	(115)	(80.3)	(1,4 3 2)		

表 4.14

考

4.10.5 まとめ

太陽エネルギーを熱源として利用するため,優れた著熱材料の開発が,システム側から期待されているが,現状 では,まだ,これと言ったきめ手になる蓄熱材料は見出されていない。ここで報告した化学反応を利用する蓄熱材 料は,顕熱, 潜熱利用の材料に比べ,いくつかの利点を持っている。反応生成物に化学エネルギーとして貯える故 まず蓄熱容器を断熱する必要がない。このことから,例えば蓄熱状態での物質移動による熱輸送も可能である。ま た燃料電池により,化学エネルギーを直接,電気エネルギーに変換する道もひらける。いずれにせよ,この化学反 応利用蓄熱材の研究は,比較的歴史が新しく,今後の発展が期待される。又,ここで述べた化学反応は,太陽光線 を熱に変換しているのであるが,直接光として利用する光化学反応に関しても調査する必要があろう。

参考文献

T.A.Chubb , Solar Energy <u>17</u> , 129 (1972)
W.E.Wentworth and E.Chen , Solar Energy <u>18</u> , 205 (1976)

4.11 太陽炉の立地条件に関係する直達日射量について

4.11.1 まえがき

太陽炉の立地選定のための日射資料としては,第一に「直達日射量」の月別値や年合計のマップが必要であるが 今のところ.わが国にはそのようなマップはないし,新たにマップを作成するための観測値もない。

一方わが国の「全天日射量」マップは、すでにかなり詳しいものが作成されているが(Ycshida and Shinoki 1976),全天日射量と直達日射量とが、完全に比例するという保証がない以上、全天日射量マップを、太陽炉 の立地選定資料に代用するわけにはいかない。

本報告においては、最近米国で作成された直達日射資料(Boes et al, 1976)を用いて、全天日射量を推定 する式を導き,これにYoshida and Shinoki(1976)による全天日射量を入れて、日本の153気象官署 の直達日射量を推定し、そのマップを作成する。

次に,太陽炉の設計・運用等のためには,ある日射強度レベル以上の場合における直達日射量に関する,いろいろの統計値が必要である。このためには,すくなくとも1年以上の直達日射の連続観測データが必要である。

このようなデータは、今のところ非常に少ないが、本報告では、サンシャイン計画の一環として、鹿児島で行われた1年間のデータを用い、日射強度レベルを0.4 kw/m および0.6 kw/m とした場合の、2.3の統計を行い、サンプルとして参考に供する。

これらの調査は、類似の資料がないに等しい現状のために、とりあえず暫定的に行ったものである。今後、デー タの集積とともにさらに詳しい調査が行われるならば、修正される点があるかもしれないことをことわっておきた い。

なお、本報告では扱う直達日射量は、すべて「法線面直達日射量」である。

4.1 1.2 日本における直達日射量マップの作成

(1) 方法とデータ

調査のフローを図4.20に示す。次に,フローにしたがって,若干の説明をする(番号はフロー番号と同じ) ① Boes et al のデータ

Boes(1975) は,全天日射量と直達日射量を観測している3地点(Albuquerque, Blue Hill,

Omaha)のデータを用い,毎時間の全天日射量/大気外全天日射量の比から,毎時間の直達日射量を推定 する方法を作成した。

Boes et al (1976)は、上の方法を用いて、米国内23地点の5年平均直達日射量を計算するととも に、前述3地点の実測5年平均値と合わせて、26地点の直達日射量と全天日射量の5年平均値表を作成し、 これを用いて、米国における月別直達日射量マップを描いた。

本調査では、このデータを用いる。

④⑤ 解析I,Ⅱ

推定式として

DN sin ⁿ h = a $_{0}$ + a $_{1}$ Q + a $_{2}$ Q²(1)

 $DN = b_0 + b_1 Q \operatorname{cosec}^n h + b_2 (Q \operatorname{cosec}^n h)^2 \cdots (2)$

DN:直達日射量

Q :全天 ″

h :太陽高度(毎月15日)

ai, bi (i=0, 1. 2):係数

の2種類を用い,最適のnを求める。

⑥ DNの最良推定式決定

DNの推定誤差が最小の場合を選ぶ

⑦⑧ 日本のデータによる検討

サンシャイン計画の一環として観測された鹿児島(1975年10月~1976年9月)と福岡(1976年 11,12月)のデータを用いて、式へのあてはまり程度を検討する。

⑨10 全国153 地点のDNの計算

Yoshida and Shinoki (1976) が作成した「積雪効果の項」を含まない全天日射量推定式

 $Q_1 = Q_0 (0.146 + 0.534 \text{ S/S}_0 + 0.036 \text{ sin } \text{h}) \dots (3)$

Q₀ : 大気外全天日射量

S/S₀ : 日照率



-110-

を用いて、153 地点の30年平均 Q_1 を計算し、つづいてDNを計算する(DNの計算に、次項の Q_2 を用いるべきではないと考えられる。)

1231 DN/Q2 比

Yoshida and Shinoki による「積雪効果の項」を含む全日射量推定式

 $Q_2 = Q_0 (0.146 + 0.0534 \text{ S/S}_0 + 0.047 \text{ G}_{1.0} + 0.036 \text{ sin h}) \dots (4)$

G₁₀ : 積雪10cm以上の月間日数を,月間総日数で除した比

を用いて, 153 地点の30年平均 Q_2 を計算し, DN/Q_2 の比を求める。

つまり、直達日射量/全天日射量の比の地域差、季節変化をみようというわけである。

(2) 直達日射量推定式

最終的に得られた推定式は

(1) DN, Q_1 が kwh/ ポ 単位の場合 DN=-1.419 + 0.895 Q_1 cosec^{1.05}h

+ 0.0468 (Q₁ cosec^{1.05}h)² (5)

(2) **D**N, Q₁ が ly単位の場合

+ 0.000544 (Q₁ cose c^{1.05}h)²(5)¹

R(重相関係数)=0.9928

E (標準誤差) = $0.2155(kwh/m^2) = 19$ ly

Eは、DNの平均値に対して3.8%である。上式によるDNの計算値とDNの原データとの比較を、図4.21 に示す。

 $DN = -122 + 0.895 Q_1 cosec^{1.05}h$

(3) 日本のデータとの比較

サンシャイン計画で観測した鹿児島と福岡のデータを、図4.21にあわせてプロットして示す。福岡の場合は (5)式による計算値と実測値がほぼ合っているが、鹿児島の場合は、計算値に比べて実測値がかなり小さい。この 理由として

(1) 桜島の噴煙の影響か(大気中の塵埃の影響は、全天日射量よりも直達日射量に対して大きい。)

(2) (5)式は、5年平均のデータを用いて作成されたものなので、元来、5年ないしそれ以上の年数の平均値に 適用されるべきである。鹿児島のデータが1年であるから、もともと比較は無理なのか。

(3) 全天または直達日射量への観測誤差か。などあげられるが、サンプルが少ないので、なんとも言えない。

(4) 直達日射量マップ

前項の⑨⑩の方法により、全国153 地点における30年(1941~1970年)平均DNを計算し、月別お よび年のマップを作成した。

そのうち、DNが最多の8月、最少の12月、および年平均のマップを、図422に示す。

マップに記入した各地点ごとの日射量のうち、() T と() M の意味は、次のとおりである。

()^T: 地形のためDNが著しく少ない地点

() M : 標高800 m以上で, 雲におおわれる時間が平地より著しく多い地点

これらの地点は、等値線をひく場合、無視してある。

また,このマップでは、大都会における大気汚染による日射減少を考慮に入れていない。したがって、例 えば、東京などについてのマップの値は、現状よりも多目になっていることに留意する必要がある。



4.21 (b)式によるDNの計算値(CAL)とDNの原資料(OBS)との 比較図。単位はkwh/m プロットのうち *は点1個を,数字は その個数だけの点が重なっていることを示す。▲印は鹿児島, ①印 は福岡

-112-





8月(1941~1970年平均)



図 4.22 b 法線面直達日射量(ly/day)

12月(1941~1970年平均)



図4.2.2 c 法線面直達日射量(ly/day)

· 年(1941~1970年平均)

-115-



図 4.23 法線面直達日射量/全天日射量(DN/Q₂)比 の季節変化



図4.24 a 法線面直達日射量/全天日射量の比(%)

8月(1941~1970年平均)

-117--



図4.24b 法線面直達日射量/全天日射量の比(%)

12月(1941~1970年平均)



図424c 法線面直達日射量/全天日射量の比

年(1941~1970年平均)

61

転返のチュモーモ (I) 国天全,(順購画情ペトャベンセ)量換日套直の平な10月0年 8701~月01年 8701 るりは功息児恵

・ ストン (アンレン・ションの15米/ボッジン・ションの15米/ボッジンの日射量化コレン(アンレン)

では10%以上も多い。 日本全体の年平均日射量をマップから概算すると, 3001y/day 位になる。これはYoshida and Shinoki (1976)か求水めた全天日射量2901y/dayとは年年年白産年日が全く偶然である。例えば Boes et al (1976)のデータから概算すると,米国全土平均直達日射量は,同じく全天日射量の120

、>冬や古の量根日室直、約極地胞科平太の本日>紛多島結西南、J丸河内ち。いかきを刃効象のも約5 学西

るるな運動な多大。 資産は日素直、フ>>比の量粮日天全、おう関票本日の資産よら45次世営水、そそなそ

。る、ハブ北ち大池園一、76美の炭地・ハネ也く演曲、小冬の量粮日 の暗東さん皓中の飲紙北、ブ焼照冬の土以 Vsb/VI 00426島諸西南ひよみ、帯一州本>約3倍一の塑内

ふるふうじ同知知れビーキシンのて、ア、クス 001~06の量根日天全、河的固全、お量根日素直の月8(1)

天金る。 次代, 図422とと図424の直接日産直内400人、マ量換日産直の424の1976)による金子

本多の月1111、約のさなとうべたかで、他のはないないないないない。 本多の月1111、約のさなとうべたいない。 ないないなどの時代生、1111、約のさなどので、 ならないないないないないないない。

、うのようし示い始本具を資料の上、おりこう図

すなわち $\mathbf{D}\mathbf{N} \setminus \mathbf{Q}_1$ 比は、 \mathbf{h} ぶ小ろ $(\gamma h 2 \times \mathbf{Q}_1)$ なた \mathbf{Q}_1 か大き $(\gamma h 2 \times \mathbf{Q}_1)$ が大き $(\gamma h 2 \times \mathbf{Q}_1)$ が大き $(\gamma h 2 \times \mathbf{Q}_1)$ がた $(\gamma h 2 \times \mathbf{Q}_1)$ がた $(\gamma h 2 \times \mathbf{Q}_1)$ がた $(\gamma h 2 \times \mathbf{Q}_1)$

着雪かない場合には, (5) たから $D N / Q_2 = D N / Q_1 = -122 / Q_1 + 0.895 cosec^{1.05}h+0.000544 Q_1 cosec^{21.0}h$

12月,年平均)龙, 図4.23と図4.24亿示示。

 表4.1 5 a 0.4 kw/m(=5.7 ly/10min)以上の時間帯における法線面直達日射量(DN, ly)

鹿児島

· .

「酸刻	(JST)	06-07	07-08	0809	09-10	10-11	11-12	12-13	1 3-1 4	14-15	1 5-1 6	16-17	17-18	18-19	計
1 月	上旬		0	0	7 8.4	187.0	2 6 9.8	287.5	2 5 2.8	167.6	146.6	2 8.6	0		1418.3
(1976)	中旬		5.7	1 3 8.1	3 3 1.6	4 5 1.1	4 2 8.6	4 5 3.8	411.1	3 5 3.3	278.9	1 5 2.6	0		3004.8
	下旬		1 2.9	241.2	362.6	384.7	4 3 9.9	404.5	372.4	367.3	3 5 6.7	169.3	1 7.8		3129.3
	月		1 8.6	379.3	772.6	1022.8	1 1 3 8.3	1145.8	1036.3	888.2	782.2	350.5	1 7.8		7552.4
	上旬		5 6.1	119.9	152.9	149.9	166.9	1 3 5.2	1 1 8.4	7 1.8	9 5.1	77.3	2 6.2		1169.7
4 月	中旬		0	4 4.9	107.2	1 3 0.9	156.4	158.2	1 1 8.0	7 6.1	4 5.5	2 4.6	0		861.8
(1976)	下旬		3 4.2	6 5.9	116.0	136.0	111.6	1 4 9.8	9 3.3	6 3.7	31.6	0	0		802.1
	月一		9 0.2	230.7	376.1	416.8	434.9	4 4 3.2	329.7	211.6	172.2	101.9	2 6.2		2833.6
	上旬	6. 1	7 6.2	1 1 8.0	121.1	154.5	136.1	118.9	1 8 5.8	1 1 8.8	6 3.4	5 5.2	16.8	0	1170.9
7 月	中旬	0	56.3	7 2.0	74.3	166.3	241.8	169.3	1 1 5.5	7 2.5	7 2.9	5 9.8	0	5.9	1106.6
(1976)	下旬	7.0	115.5	202.6	340.0	374.7	4 5 3.1	481.4	393.2	321.3	271.3	198.5	9 6.2	4 3.2	3298.0
	月	1 3.1	248.0	392.6	535.4	695.5	831.0	769.6	694.5	512.6	407.6	3 1 3.5	113.0	4 9.1	5575.5
	上旬		1 0 0.2	256.9	295.7	324.2	364.6	3 0 2.3	447.2	366.7	307.3	206.7	5.7		2977.5
1 0月	中旬		5 2.6	97.5	119.4	220.6	172.2	1 1 2.8	114.7	7 5.6	5 6.4	1 3.3	0		1035.1
(1975)	下旬		6.0	1 2 0.9	165.1	2 4 9.7	308.4	307.4	3 3 6.4	295.2	154.5	6 0.8	0		2004.4
	月		1 5 8.8	475.3	580.2	794.5	845.2	7 2 2.5	898.3	737.5	518.2	280.8	5. 7		6017.0

• د

-

表4.15b 0.6kw/m²(=8.6 ly/	´10min) 以上の時間帯におけ	る法線面直達日射量((DN_2, ly)
--------------------------	-------------------	------------	--------------

一時刻	(JST)	06-07	07-08	08-09	09-10	10-11	1 1-1 2	12-13	13-14	14—15	15-16	16-17	17-18	18-19	計
	上旬			0	0	106.7	156.5	171.6	183.5	113.9	67.9	0			800.1
1 月	中旬			4 6.3	221.7	3 5 7.0	406.9	4 3 9.9	370.4	309.6	2 5 2.6	2 6.7			243 1 .1
(1976)	下旬			1 3 7.5	3 3 8.5	371.2	4 2 0.0	384.6	3 5 9.7	345.8	3 3 4.3	96.6			2788.2
	月			183.8	560.2	834.9	983.4	996.1	913.6	769.3	654.8	123.3			6019.4
	上旬			8 2.3	1 1 9.7	1 2 9.9	166.9	1 2 2.4	6 8.3	6 5.0	8 0.4	3 7.0			871.9
4月	中旬		:	0	4 6.6	6 8.8	111.2	150.6	1 1 8.0	2 7.7	0	0			5 2 2.9
(1976)	下旬			3 6.0	9 1.3	114.4	7 2.5	7 3.7	7 0.3	5 6.6	0	0			514.8
	月			1 1 8.3	257.6	3 1 3.1	350.6	346.7	2 5 6.6	1 4 9.3	8 0.4	3 7.0			1909.6
	上旬		0	9.6	3 5.6	7 3.3	6 9.2	6 9.8	1 3 8.8	6 4.8	5 6.1	3 5.9	8.8		561.9
7 月	中旬		2 8.5	2 9.8	3 6.5	1 4 5.0	2 0 0.8	140.8	4 1.9	1 7.4	5 7.9	3 7.0	0		7 3 5.6
(1976)	下旬		2 7.4	1 5 3.1	243.9	269.2	362.4	421.5	3 6 5.1	298.9	2 1 9.7	1 4 2.8	7 5.0		2579.0
	月		5 5.9	192.5	316.0	487.5	632.4	632.1	5 4 5.8	381.1	3 3 3.7	215.7	8 3.8		3876.5
	上旬		2 7.2	168.5	2 2 5.9	2 4 3.6	3 1 2.8	246.9	4 1 6.0	344.0	2 2 5.4	9 2.9			2303.2
10月	中旬		0	4 6.4	77.7	199.5	160.0	9 7.6	926	756	4 8.3	0			797.7
(1975)	下旬		0	8.6	104.8	2 0 8.6	244.3	273.4	3.006	181.6	87.5	0			1409.4
	月		2 7.2	223.5	408.4	651.7	7 1 7.1	617.9	8.0 9 2	601.2	361.2	9 2.9			4510.3

鹿 児 島

図 4.15 c 法	線面直達日射量が 0.4	kw/m^2 (= 5.7	ly/10min)	以上の時間数(T	, hr)
------------	--------------	------------------	-----------	----------	-------

															鹿児島
時刻(JST)	06-07	07-08	08-09	09-10	10-11	11-12	12-13	13-14	14-15	15-16	16-17	17-18	18-19	言 十
	上旬		0	0	1.8	3.3	5.2	5.7	4.3	3.2	3.0	0.7	0		2 7.2
1 月	中旬		0.2	3.0	6.0	7. 3	6.2	6.5	6.2	5.5	4.8	3.5	0		4 9.2
(1976)	下旬		0.3	4.7	5.7	5.5	6.0	5.5	5.0	5.3	5.7	3.3	0. 5		47.5
	月		0.5	7. 7	1 3.5	1 6.1	1 7.4	1 7.7	1 5.5	1 4.0	1 3.5	7.5	0.5		1 2 3.9
	上旬		1.3	2.3	2.8	2.7	2.5	2.2	2.2	1.2	1.7	1.7	0.7	1	2 1.3
4 月	中旬		0	1.0	2.3	2.5	3.0	2.8	2.0	1.5	1.0	0.7	0		1 6.8
(1976)	下旬		0.8	1.3	2.2	2.5	2.2	3.0	1.7	1.2	0.7	0	0		1 5.6
	月		2.1	4.6	7. 3	7. 7	7.7	8.0	5.9	3.9	3.4	2.4	0.7		5 3.7
	上旬	0.2	2.0	2.7	2.7	3.3	2.8	2.3	3.5	2.3	1.2	1.2	0.7	0	24.9
7 月	中旬	0	1.2	1.5	1.5	2.8	4.0	2.8	2.3	1.7	1. 3	1.2	0	0.2	2 0.5
(1976)	下旬	0.2	2.5	3.7	5.8	6.3	7.3	7. 5	6.0	4.8	4.5	3.5	1.8	1.0	5 4.9
	月	0.4	5.7	7. 9	1 0.0	1 2.4	14.1	1 2.6	1 1.8	8.8	7.0	5.9	2.5	1.2	100.3
	上旬		2.3	5.2	5.2	5.3	5.7	4.7	6.7	5.8	5.7	4.3	0.2		5 1.1
10月	中旬		1.3	2.0	2.3	3.5	2.7	1.7	1.8	1.2	1.0	0.3	0		1 7.8
(1975)	下旬		0.2	2.8	3.2	4.5	5.3	5.3	5.8	5.7	3.2	1.5	0		3 7.5
	月		3.8	1 0.0	1 0.7	1 3.3	1 3.7	1 1.7	1 4.3	1 2.7	9.9	6.1	0.2		106.4

表4.15 d	法線面直達日射量が0.	6 kw∕m²(=	8.6 ly / 10 min)以上の時間数(́Тэ,	hr)
---------	-------------	-----------	------------------	----------	------	-----

													_		此儿崗
	ST)	06-07	07-08	0809	09-10	10-11	11-12	12-13	13-14	14-15	15-16	16—17	17-18	18-19	計
	上旬		·.	0	0	1.7	2.5	2.8	2.8	2.0	1.2	0			1 3.0
1 月	中旬			0.8	3.5	5. 3	5.7	6.2	5.2	4.5	4.2	0.5			3 5.9
(1976)	下旬			2.3	5.2	5.2	5.5	5.0	4.7	4.8	5.2	1.7			3 9.6
	月			3.1	8.7	1 2.2	1 3.7	1 4.0	1 2.7	1 1.3	1 0.6	2.2			8 8.5
	上旬			1.5	2.0	2.2	2.5	1.8	1.0	1.0	1.3	0.7			1 4.0
4 月	中旬			0	0.8	1.2	1.8	2.7	2.0	0.5	0	0			9.0
(1976)	下旬			0.7	1.3	2.0	1.2	1.2	1.2	1.0	0	0			8.6
	月			2.2	4.1	5.4	5.5	5.7	4.2	2.5	1.3	0.7			3 1.6
	上旬		0	0.2	0.7	1.5	1.2	1.2	2.3	1.2	1.0	0.7	0.2		1 0.2
7 月	中旬		0.5	0.5	0.7	2.3	3.0	2.2	0.7	0.3	1.0	0.7	0		1 1.9
(1976)	下旬		0.5	2.5	3.7	4.0	5.3	6.2	5.3	4.3	3.3	2.2	1.3		3 8.6
	月		1.0	3.2	5.1	7.8	9.5	9.6	8.3	5.8	5.3	3.6	1.5		6 0.7
	上旬		0.5	2.8	3.5	3.5	4.5	3.3	6.0	5. 3	3.7	1.7			3 4.8
1 0 月	中旬		0	0.8	1.3	3.0	2.3	1.3	1.3	1.2	0.8	0			1 2.0
(1975)	下旬		0	0.2	1.8	3.5	4.0	4.5	5.0	3.2	1.5	0			2 3.7
-	月		0.5	3.8	6.6	1 0.0	1 0.8	9.1	1 2.3	9.7	6.0	1.7			7 0.5

鹿児皇

表 4.1 6 0.4 kw/m(=5.7 ly/10min)および 0.6 kw/m(=8.6 ly/10min)レベルの法線面直達

	法線	面直達日象	這	DN ₁ , DN	₂ の時間	· 全 天	日照								日照率	太 陽
月	0.4 kw∕m ²	0.6 kw∕ m²	沙 公 日	0.4 kw∕m²	0.6 kw∕m²			TAN TAN	την το άρνι			TT 1 / C	T 2 / C	m . /m .		高 度
	レベル	レベル	称正里	レベル	レベル	日射量	時 間	DINI/ DIN	LIN4/ DIN	DINI/ Q	Div4/ Q	11/0	1 - / 5	12/11	S/So	(15日)
	DN ₁	DN ₂	D N	Τ ₁	T 2	Q	S									h 🔘
1月(1976)	75.5 ×10 ³	60.2×10^{3}	88.0×10 ³	1 2 3.9	8 8.5	73.6×10^{3}	164.8	86	68	103	82	75	54	71	52	3 7.2
4月(1976)	28.3	19.1	38.3	5 3.7	3 1.6	8 2.0	102.8	74	50	35	23	52	31	59	30	6 8.0
7月(1976)	55.8	38.8	73.4	1 0 0.3	6 0.7	129.6	173.6	76	53	43	30	58	35	61	40	80.0
10月(1975)	60.2	45.1	73.2	106.4	7 0.5	91.4	162.7	82	62	66	49	65	43	66	46	50.1
単 位	kcal∕m²	kcal/m²	kcal/m²	hr	h r	kca l∕nť	hr	16-	%	%	%	%	%	%	%	度

日射量についての統計表(鹿児島)

4月は欠測4日を除いた。

-125-

このうち, 直達日射量は, 打点式アナログ記録と, デジタル積算記録(10分間づつ60分まで積算)の両方 が用いられた。

表4.15 a ~ dは, 直達日射のデジタル記録紙から, 10分間日射量を読みとり, 旬別, 月別に,

●日射強度が0.4 kwh/m(=0.571y/min)レベル以上

の時間帯における,直達日射量および時間数の集計を行った結果である。

ただし,代表月として,1,4,7,10 月の4か月を選んだ。

(2) 0.4 および 0.6 kwh/ ポレベルの直達日射量についての統計

表4.15 の結果を,月ごとに集計したのが,表4.16 である。

日射量は、各月の積算値をkcal/m² で示してあるが、10³ kWh/m² = 1.163 kWh/m²である。

i) $DN_1 \cdot DN_2$

DNに対して、DN₁ は70~90%、DN₂ は50~70%のようにみえる。

Qに対するDN1, DN2の比率は、季節によって大巾に変化し、冬大きく、夏小さい傾向がある。

今回の4か月に関する限り、DN₁の月積算値は 28~76×10³ kcal/ \vec{m} , DN₂ は19~60× 10³ kcal/ \vec{m} である。

(i) T₁, T₂

日照時間に対する比率は、T₁が50~80%、T₂が30~60%のようにみえる。

T1 に対するT2の比率は60~70%で、季節によりあまり変化しないようにみえる。

今回のデータだけでいえば、 T_1 の月積算値は54~124hr, T_2 は32~89 hr である。

図4.25 は,表4.15 の結果を用いて,各日射レベルの時間数の日変化をグラフにしたものである。グラフの若千の凹凸は、サンブル不足によるものである。

また,図4.26は、アナログ記録から、天気が良い日の、朝夕における各日射レベルの始終時刻を読みと ったものである。

図4.25 と図4.26 の始終時刻は、当然一致するものであるが、図4.26 から判るとおり、個々の日にお ける始終時刻は、大気の混濁度により、0.5~1時間程度前後することは注目に値する。

4.1 1.4 結果の利用上の注意

(1) 直達日射量推定式(5)および(5) の,わが国における適用性はまだ十分確められていない。したがって,これ を用いて作成した図4.22~4.24のマップについては,数値そのものを信用するのは危険であり,その分布傾 向だけを利用していただきたい。

(2) 0.4 および 0.6 kwh/ mの日射レベルの統計の結果については、わずか 1 年だけのデータにもとづくものであるから、各数値は、おおよそのオーダーを示すものとみなしていただきたい。

	日照時間平年比較	各月の日照時間の変動係数
1月(1976年)	+ 1 2 %	1 6 %
4月(11)	-39	2 2
7月(//)	- 1 5	2 2
10月(1975年)	- 1 7	1 2

なお,一般に 日照時間の年々の変動は大きいものである。今回用いた各月の状況は,次の通りである。



-127-

0.4 kw/㎡(o)と 0.6 kw/㎡(A)に達する時刻

0.4 kw/m(0) と 0.6 kw/m(>)以下になる時刻





に達する始終時刻(鹿児島)

変動係数は、標準偏差/平均値で、上の値は日本気象協会(1975)から引用した。

上の表からわかるとおり、1975 年10月と1976 年4月は、日照時間が平年に比べて異常に少なかった。 この調査のサンプルは、このようにかなり特殊なケースである。

参考資料

Boes, E, C., I.J.Hall, R.R.Prairie, R.P.Stromberg

and H.E.Anderson (1976) : Distribution of direct and total solar radiaton availabilities for the USA.Joint Conference, American Section of International Solar Energy Society and Solar Energy Society of Canada, Inc, Aug. 15-20, 1976, Winnipig, Vol. 1, 238-263

Yoshida, S. and S. Shinoki (1976) : Preparation of monthly mean global solar radiation maps for Japanese islands. Sunshine Project, pp 44.

> 日本気象協会(1977) : 太陽エネルギーシステムの研究(気象調査),昭和57年3月,昭和 51年度サンシャイン計画報告書

日本気象協会(1975): 全天日射量,日照時間の観測資料,太陽エネルギーシステム気象資料 M3.サンシャ イン計画報告書,昭和50年3月

4.12 太陽炉の立地条件

4.12.1 まえがき

本稿で取り上げるところの太陽炉の立地条件とは,立地主体たる太陽炉が合理的に好ましい立地を選択する際に 有利な立地を獲得するための地域的な諸条件のことである。

一般に立地条件とは、気象、地形、地質、水文などの自然的条件、労働力、地価、市場、社会環境などの経済社 的条件など多様であるが、これらの立地条件は全ての立地主体に対して普遍性をもつものでなく、個々それぞれに 様々である。

では太陽炉の立地条件は一体どのようなものであろうか、以下その検討を行うにはまず第一に太陽炉の技術的諸 条件が明らかにされていなければならない。

技術的諸条件とは、太陽炉の形式,構造,規模,利用目的などであり,それらが単に何々方式とか,何 kw の出力とか、あるいは利用目的が試験研究用だとかでなく、かなり具体的な内容あるいは量化されたものでなくてはならない。

また,太陽炉が立地した周辺地域の自然及び社会環境にどのようなインパクトを与え,その影響の度合い及びその対応策についても事前に検討しておく必要がある。

これらの諸条件は,多種多様な因子から成り立っており,また因子間の関連が複雑であるので,現段階において その因子分析を十分に行えない状況にある。

従って、ここでは極く一般的に考えられる太陽炉の立地条件をランダムに抽出し、それらの重要度について触れるとともに、実験用太陽炉(1.000kwを想定)を対象に、その候補地について若干の考察を行うこととする。

4.1 2.2 太陽炉の立地条件

太陽炉の立地条件には,以下の如き内容のものがあげられる。

① 日射条件がよいこと。

太陽炉は 地表面に到達する太陽の放射エネルギーを利用するものであるから,当然日射条件が最も重要な立 地条件となる。

日射条件は単に日射量(ここでは直達日射量のこと)だけが対象にされるのでなく,日射条件に深い関連をもつ雲量,日照時間,曇天日数などの諸条件も考慮される。

太陽炉にどれほどの直達日射量が必要であるかは、炉の形式、構造、利用目的によって異なるが、いずれにせよ日射量の絶対量(総量)が大きく、かつその変化度が少ないことが立地条件のよい地点といえる。

② 強風の出現が少ないこと。

炉の操作の安定性及び保守管理面から、台風の襲来あるいは強風の出現が少ない地点であること。

③ 自然災害の発生が少ないこと。

強い地震,落雷,降ひょう,豪雪などの発生は炉にかなりのダメージを与えるので,これら自然災害の発生が 極めて少ない地点であること。

④ 積雪量が少ないこと。

炉の運転効率,保守管理面から,積雪のほとんどない地点がよい。

⑤ 湿度が低く、塩害がないこと。

湿度が高いことや塩害の発生は,機器の腐食,維持管理上の困難化をもたらす原因となるので,湿度が低く, 塩害を受けない地点であること。

⑥ 大気汚染による影響を受けないこと。

大気中の汚染物質によって、機器の腐食、ミラーの汚染などの被害を受けない地点であること。

⑦ 必要な用地が十分に得られること。

炉の諸施設に必要な用地以外に、周辺地域と遮断するための保守用地が得られる地点であること。

⑧ 炉の利用者に便利な位置にあること。

炉が試験研究用か、あるいは実用であるか、のいずれにせよ、その設置場所は炉の利用者にとって便利な地点であることが望ましい。

⑨ 建設資材の搬入が可能なこと。

炉の建設時の建設資材には、ものによっては重量物あるいは長尺物がある。

それらの搬入は,船舶や大型トレーラーによって行われるので,港湾の荷揚げ施設あるいは十分な幅員と堅牢 な陸上交通路が装備されている地域でなくてはならない。

⑩ 航空路から離れていること。

炉の反射光線などによって飛行中の航空機に障害を与へないため,所定の航空路から離れた地点であること。 ① 土地利用上の規制がないこと。

国土の有効利用, 諸産業の生産活動, 自然環境の保全, 諸地域の開発計画などから, 土地利用に関する様々な 規制措置がとられているので, それらに抵触しない地点であること。

つまり,生産性の高い農林業用地,自然保護地区,工業等開発予定地域などは避けなくてはならない地点である 以上,(1)から(1)までの立地条件は,比較的重要度の高いものといえるが,それら以外につぎに示す諸条件も考

-130-

慮しなくてはならない

① 地 形

地形条件は, 炉の形式, 構造によって考え方が異なるが, 一般的にいって, 特に大きな起伏がなく, また著し く勾配の強い地形でなければ問題はない。

だが、炉の形式、配置の仕方によっては、利用斜面の方位が制約される場合も考えられる。

2 地質, 地盤

軟弱地盤や地崩れしやすい地質でなければよいが,特に地耐力を要する施設の部分は,良質な地盤かまたは地 盤改良が経済的に可能な地点であること。

③ 用 水

炉の構造,利用方法によって必要な水量は異なるが,いずれにしても大量の用水は必要としない。 用水を使う主たるものは,炉心部の冷却水程度であり,その水量はおよそ日量数百トンぐらいである。 従って,温排水問題はないと考えてよい。

④ 周辺環境

近傍に人口密集地区がなく、なるべく人口密度の低い地点が望ましい。

⑤ 用地取得

家屋移転、鉱業権などの補償問題がなるべくなく、かつ地価の低い地点が望ましい。

運転管理

炉の運転及びメインテナンスに関する人的物的,情報の交流に便利な地点が望ましい。つまり,交通,通信に 便利な地点がよい。

⑦ 建設費

太陽炉に限ったことではないが、炉の建設費(土木,建設工事費,資材等輸送費など)は、常識的に妥当な価格で建設が可能な地点であること。

以上、太陽炉の一般的な立地条件に関し、概念的かつ定性的な考察を行った。

これら各条件の具体化あるいは定量化は、今後行われる太陽炉の技術的検討や利用上の検討を待つより方法は ないが、ある程度の定量化、利用目的が明らかになれば、炉の候補地を選択することも可能である。

- 4.1 2.3 実験炉の候補地の考察
 - (1) 候補地の選定方法

実験炉の候補地の選定は、以下に示す手順によって行うことができる。

なお、ここで選定する候補地は、かなり粗い選定条件によって抽出された地域が対象となっており、具体的に 実験炉の適地を選定するには、さらにこれら候補地を何らかの評価基準によって適応性を評価する必要がある。

① 現在想定されている実験炉のモデルと前項2 で検討した太陽炉の立地条件から,実験炉候補地の選定条件 を設定する。

② 別途の作業として行われた「太陽熱発電所適地調査」の結果を用い、候補地を選定する。

この調査は、全国を対象に日射条件等の気象条件、土地利用上の規制条件を考慮して適地を選定したもので あるので、太陽炉の選定条件とは基本的に同一と考えてよいと思われる。

従って、実験炉の候補地選定のベースデータに、この調査結果は利用できる。

具体的な実験炉の候補地選定は図427のフローチャートに示すごとく,消去法によいと思われる。

図4.27 実験炉候補地選定フローチャート



注) 選定条件は4つに限るも のでないこのフローチャ ートは単に例示したのに 過ぎない。

(2) 候補地の選定条件

実験炉は,現段階では出力1.000kwのものを想定しており,必要基数は定かでない。

1.000kw実験炉の立地には、用地面積約30.000m^d(保守用地を含み)、用水量数100 トン/日が必要と 想定されるが、太陽熱発電所の適地に選定された地域は、ほべその条件を満たしているものと解釈される。 候補地選定条件は、以下のごとくである。

i) 直達日射条件がよい地域であること。

直達日射量の観測は,末だ極く一部で行われているに過ぎないので,前項の「太陽炉の立地条件に関係する 直達日射量について」の検討結果を参考にすることができる。

この検討は、1941年から1970年までの年平均、8月及び12月の直達日射量を全天日射量から推定し、 それをマッピングしている。

ii) 台風の襲来, 強風の出現が少ない地域であること。

過去の台風襲来の頻度及び強風出現の確率が少ない地域を,各種の記録から読みとる。

Ⅲ) 大気汚染の影響を受けない地域であること。

大気汚染物質の発生源は,大都市及び工業集中都市であるので,それら地域からある一定の距離を除いた地 域を対象とする。

Ⅳ) 塩害の受けない地域であること。

塩害は、海側から内陸部に吹く強風によって起るといわれているので、沿岸部は対象から除く。

従って候補地は内陸部となる。

- V) 積雪がない地域であること。
 - 過去の積雪の記録から判断し,積雪地域は除く。
- (3) 候補地について

前項までの候補地選定の方法及び選定条件によって選定作業を行えば、ある程度の候補地域からクローズアップされると解されるが、時間的な制約もあり、いま直ちにその作業が行える状況にない。

そこでかなり大雑把ではあるが、幾つかの候補地域について述べておこう。

日射条件の良い地域は,日本列島中央部以西の地域であるが,年間を通じ比較的日射量の変動の少ない地域は 以下である。

- ① 東海地域(主として静岡県)
- ② 紀伊半島中央部以南地域
- ③ 瀬戸内地域(岡山県以西~山口県東部)
- ④ 四国地域(全域)
- ⑤ 九州東南地域(大分県東部~鹿児島県)

この地域のうちで④の太平洋沿岸地域及び⑤の地域は,台風襲来の頻度が多いので,候補地から除いて考える べきであろう。

さらに,強風と塩害の影響を考慮すること。①及び②の沿岸部地域を,大都市と工業地帯の影響を考えると, ①及び③の沿岸部地域を除外地域とすべきであろう。

このようにみてくると,実験炉の候補地域は,次のうちから選択すべきと考える。

- 東海地域(静岡県)の内陸部
- ② 紀伊半島の内陸部(三重及び和歌山県)
- ③ 瀬戸内地域の内陸部(岡山,広島,山口,香川,愛媛,徳島の各県)

なお、参考までに既述の「太陽熱発電所適地調査」の際に選定された発電所適地を表4.17に付した。

これらの適地は、わか国土で日射条件のよい地域から選ばれたものであり、a,b, cの各記号は、日射条件等のプライオリティを評価し、ランクを付けて行ったものである。

いま、このうちで最も良い a ランクの適地から実験炉の候補地域を抽出すると(同表の太字で囲んだもの)9 県の総面積は 4.0 0 0 h a (4.0 0 0万㎡)というかなりの用地が存在していることになる。

だが,これらの適地には,臨海部にあるもの,工業地帯に近接しているものも含まれているので,全てが実験 炉の適地とはいえない,

表 4.1 7 地域別太陽熱発電所適地一覧表

(単位:ha)

44 +-1	B		~	適	地	面	積
地域	275	i.	1	А	В	С	合 計
				ha	ha	ha	ha
	8	茨	城		30	2 0	5 0
関	- 9	栃	木		10	690	700
	10	群	馬		4,0 0 0		4,0 0 0
東	19	Щ	梨		8,1 4 0		8,140
	2 0	長	野	700	2,4 9 0		3,1 9 0
Ŧ	2 1	岐	阜	690	1,4 2 0	1,090	3,2 0 0
凩	22	静	岡	200	7,660		7,860
jin ji	2 3	愛	知	310			310
(吽	24	Ξ	重	1,590	1,9 4 0	320	3,8 5 0
ý	2 5	滋	賀		210	1,1 0 0	1,3 1 0
<u>XI</u>	26	京	都			60	6 0
414	29	奈	良		140		140
武	3 0	和哥	灰山	2 0			2 0
中	33	岡	山	4 0	630	150	820
E.	34	広	島	190	2,8 6 0		3,0 5 0
国	3 5	山		8 0	140		220
TTEL	36	徳	島	330	2 0		350
본데	37	香	刑	820	10		830
121	38	愛	媛	730			730
西	39	庮	知	470			470
	40	福	岡		1.340	600	1,9 4 0
	4 1	佐	賀	330	2,0 4 0	3 0	2,4 0 0
九	4 2	長	崎	410	1,670	3 0	2,110
	43	熊	本	640	3,160		3,8 0 0
.10	44	大	分	110	2,7 2 0		2,8 3 0
州	4 5	宮	崎	410	1,6 3 0		2,0 4 0
	46	鹿!	児島	3,4 5 0	6,320		9,770
合		_	計	1 1,5 2 0	4 8,5 8 0	4,0 9 0	6 4,1 9 0

昭和51年度「太陽熱発電所適地調査」より
4.13 結 言

第3小委員会として51年度は従来の化学反応を伴う高温プロセスへの太陽炉の利用の調査研究として,カーボラ ンダムの製造,高温ガス反応への利用,高温化学反応による蓄熱技術等の検討に加え,太陽炉の経済分析,立地条件 と気象の関連等にも考案を加えた。本委員会の研究調査の対称は,もともと模索の連続であり,太陽炉の高温反応の 利用分野を手さぐりで探求する努力を続けてきたわけである。さらに今年度は大型太陽炉のソフトウエアの検討が加 わったので各委員の努力により最終年度のまとめに漕ぎつけた次第である。

大型高温太陽炉の試験炉の建設と評価は,他の太陽エネルギー機器に比較して高精度のコンポーネントを必要とする上に,建設コストが高いためすぐさま経済的評価に耐えてその実現を急ぐことは困難と思われるが,その高温特性 を始めとして他に見当らぬ独特の性能を有していることから今後も基礎的な問題解決の努力を積み重ねてゆくべきである。

5まとめ

昭和49年度において大型1000kw太陽炉の概念設計を行うと共に,太陽炉利用状況の調査と利用目的の分析に着 手した。昭和50年度においてはさらに調査研究の対称を,溶融耐火物の製造,シリコンの太陽エネルギーを利用した 生産,および化学反応を伴う高温操作の三項目に絞り検討を続けた。昭和51年度は本調査研究の最終年度としてこれ までの研究成果をとめる意味において,溶融耐火物の製造,シリコン生産の各プロセスの検討および化学反応を伴う高 温操作の太陽炉による可能性を追求すると共に,加えて大型太陽炉の経済性分析,気象ならびに立地条件,大型太陽炉 の安全性とメインテナンス,公害問題等のソフトウエアについてもまとめる努力を続け,高温太陽炉利用システムなら びに太陽エネルギーの一般産業用高温熱源としての検討を行った。

本来太陽炉は太陽エネルギー利用システムの中でも最も高い温度領域に到達しうる光学系であると同時に,その光学 系の建設コストも他の低温分野における太陽エネルギー利用システムに比較して高価にならざるを得ない。したがって 利用目的の分析においても付加価値の高いものが要求されることが前提となる。現在の高温産業の熱源は主として電力 に依存している関係上,長期的な観点から千数百度以上の高温産業熱源を何に依存するか,或いはエネルギーバランス 上どのように考えてゆくか等の問題は当然提起されるべき性質のものであり,これを背景として51年度の調査研究に おける努力が集中された。

なお不確定あるいは不明な要素の多い中で模索を続けたため、明瞭な結論の十分得られない課題も残ったが、限られ た時間の中で学際的な分野の討議,検討が進められ、今後の課題が浮き彫りにされたことは大きな成果に挙げられると 考える。

本報告書の作成に当り、工業技術院サンシャイン計画推進本部ならびに日本電機工業会の多大の御協力を得たことを 感謝したい。また本報告書は専門委員会ならびに各小委員会委員により分担執筆した。 6 太陽炉専門委員会の研究成果のまとめ(昭和49~昭和51年)

6.1 まえがき

太陽炉専門委員会は,主として大型太陽炉の機能とその果すべき役割り,利用目的の分析,高温産業用熱源との協調方式,経済性,今後の開発計画における課題の発堀等を中心として昭和49年度より3ケ年にわたる調査研究を行った。中でも大型太陽炉の利用目的の分析に重点をおいて,特に昭和50年,51年の2年間は三つの小委員会を組織し,次のような分担で研究を推進した。

第1小委員会 太陽炉による溶融耐火物の生産

第2小委員会 金属特にシリコンの太陽エネルギーによる生産

第3小委員会 化学反応を伴う高温操作ならびに太陽炉の経済性,安全性,立地条件と日射等の検討

また第2小委員会では、シリコンの生成過程を5ステップに分け、各ステップ毎に必要に応じて分科会を設け検討 を進めた。ここで各年度における本委員会の研究活動と成果の概要ならびに今後の課題について述べる。

6.2 昭和49年度の活動と研究成果

初年度においては次の各点を中心に調査研究を行った。

(1) 大型太陽炉の現状とそれらの構造,機能,性能と用途の調査と分析

(2) 高温エネルギー多消費型産業のエネルギー需給の調査と分析

(3) 太陽炉の利用目的の分析

以上のこの三項目より得られた成果の概要は次の通りである。

(1) 大型太陽炉の現状については主に仏ビレネーの1000kw太陽炉について調査を行い、大型太陽炉の構造とし て光軸水平型へリオスタット方式が最も適当であり、炉心や平面鏡ならびに放物面反射鏡の反射鏡素子,追尾シス テム等にも検討を加えると共に、これらの成果を利用して1000kwt 大型太陽炉の概念設計を行った。

(2) 高温エネルギー多消費型産業とは主に電熱化学工業が含まれるが、黒鉛、カーボランダム、フエロアロイ、カーバイド、電融耐火物等1.500~2000℃以上の温度領域で電力ならびに石油を大量に消費する工業や、これに次ぐセメント、製鋼用等のエネルギー消費の推移を明らかにし、省エネルギーと省力化問題も併せて今後の新エネルギー資源の開発の方向を示唆した。

(3) 太陽炉の利用目的の分析においては、金属特にシリコンの製造において原料珪石の還元による粗シリコンの生成から精製、分解、単結晶シリコン製造までの各ステップを太陽エネルギーにより行う提案を始めとし、太陽熱発電、太陽熱電子発電、産業廃棄物の熱分解、セラミック舗装道路の製作、シラスバルーン製造等の提案がなされた。

6.3 昭和50年度の活動と研究成果

大型太陽炉のハード面の概要については前年度にほぼ検討を終了したため,第2年度は研究調査の対称を主に利用 目的の詳細な分析とそれに関連する炉心部の構造の分析に置いた。最初に述べたように50年度より専門委員会の下 に小委員会を3つ編成し,溶融耐火物の生産,金属特にシリコンの生産と化学反応を伴う高温プロセスについて検討 を行った。それらの成果の概要は次の通りである。

(1) 溶融耐火物の生産

これまでわが国を含め各国においても太陽炉による高融点材料の溶融試験と物性測定は行われてきたが、産業用

の落融耐火物としてのそれら生成物の検討は殆んど行われていなかった。従ってこれらがいわゆる市販の電融耐火物と比較してどのような差異を持ち特徴を有するかが明らかでなく、今後の太陽炉の使用の方向づけを行うにも先ずこの点を明らかにする必要に迫られた。このため名工試小型太陽炉の溶融試片を利用して、一般に広く利用されるジルコンサンド、MgO - CaO 系、MgO - Al₂O₃、(スピネル)、MgO - Cr₂O₃(マグクロ)、 Al₂O₃ - SiO₂系(ムライト)、 Zr_2 - CaO系(安定化ジルコニア)、Al₂O₃ - Cr₂O₃系、MgO - chromite系溶融耐火物について解析を行い、太陽炉の急熱急冷特性が明らかにされた。 (2) 太陽エネルギーの利用によるシリコンの生産については、次の5ステップについてそれぞれの反応過程と光学系の選択、加熱方式、蓄熱あるいは補助熱源サブシステム等の検討を行った。すなわち

- 第1ステップ : 珪石より粗シリコンの製造
- 第2ステップ : 粗シリコンと塩酸よりSiHC ℓ_3 の生産
- 第3ステップ: SiHCl₃の精製
- 第4ステップ : SiHCL₃の熱分解によるシリコンの生産
- 第5ステップ : シリコン単結晶の成長

以上の中第2および第3ステップについては技術的にも可能であることがわかったが,第5ステップは補助熱源 を必要とする上に温度制御の問題が難しいことが指摘された。第1および第4ステップについては結論が出るまで に至らず次年度へ持ち越しとなった。なお技術的な問題の細部についてはそれぞれ分科会において討議を行った。 (3) 化学反応を伴う高温プロセスでは太陽炉による金属カルシウムの製造、カルシウムカーバイドの製造、炭化水 素の火炎分解プロセス重油すすのガス化、オゾンの製造、高温蓄熱プラズマジエットの併用が検討され、それらの 反応過程,太陽炉利用の可能性と得失,問題点が明らかにされた。

6.4 昭和51年度の活動と研究成果

最終年度として太陽炉の利用目的の分析についてまとめを行うことと,大型太陽炉の経済性分析,安全性,メイ ンテナンス,日射量と立地条件等についても検討を行った。それぞれの利用目的の分析に関しては前年度通り第1~ 第3小委員会と,第2小委員会はさらに分科会に分かれて研究調査活動を行い,大型太陽炉の経済性分析等のソフト テクノロジイに関しては第3小委員会で研究を行った。

(1) 太陽炉による溶融耐火物の生産については、特にジルコンサンドとムライトに焦点を絞り、それらの溶融性状 を明らかにし 急熱急冷による微細構造体が得られることが見出された。さらに現状では電融耐火物と比較して太 陽炉で高温耐火物を溶融する場合は 6 ~ 7 倍のコストが必要であることが推定された。また無重力空間における太 陽炉の利用の可能性についても言及し、均一融体や無欠陥単結晶を得るに有望な高温到達手段であることを述べた。 (2) 太陽炉によるシリコンの製造においては 5 ステップの中、本年度は特に第 1 ステップ建石より粗シリコンの製 造と第 4 ステップ Si HC ℓ_3 の分解によるシリコンの析出の 2 テーマに絞って調査研究を行った。第 1 ならびに第 4 ステップ共にシリコン生成の可能性が認められ、SiO₂ + 1.5C 組成から太陽炉によるシリコンの生成が 2 0 ~ 40 % で期待される。今後反応装置、温度制御技術等の詳細な研究開発により、建石よりシリコン単結晶の生産ま で一貫して太陽エネルギーでその熱源をまかなうことは技術的に可能と推定された。

(3) 化学反応を伴う高温操作の検討については、太陽炉によるカーボランダムの製造や高温ガス反応への応用ならびに高温化学反応による蓄熱への利用が調査された。大型太陽炉の経済性については、建設費が太陽熱発電の場合より高く、直達日射量が 0.4 ~ 0.6 kw/n 必要であり、稼動率の点でも低いことからエネルギー変換装置としては

太陽熱発電の実用化された後の技術開発課題と見られる。たゞ他の加熱炉に見られない特徴があるのでこれを生か すことによりその価値が生れようと結論された。また炉心部は空洞型が好ましく,稼動率を上げる意味でも炉心部 を含むシステム全体の発停をできるだけ迅速に行えるものが必要であることが見出された。

これらの他大型太陽炉の保守,安全性,公害問題の点につき検討を加え,さらに直達日射量の日本における分布 マップを推定して立地条件を検討した結果,大型太陽炉の建設には東海地方内陸部,紀伊半島の内陸部,瀬戸内地 域の内陸部が好ましいとの結論を得た。

6.5 結 言

以上3ヶ年にわたる大型太陽炉の各種の問題点について調査研究を行った。年次途中に出席委員の変更もあり、特 に第2小委員会主査の小林委員の急逝も加わったが、各委員の努力により大型太陽炉についての調査研究をひとまず 終了することができた。

太陽炉は太陽エネルギー利用機器の中でも最も精度および集光比が高く,かつ高温で作動するが同時に建設コスト も一番高い。したがって蓄熱やエネルギー資源の間欠性について大きな困難性が伴うが,その加熱特性は他の加熱炉 にないものがあり急熱急冷の可能な点があげられる。

特に大型太陽炉の経済性については,充分詳細な結論を得るまでに至らなかったが,これはその用途,目的を規定 して炉心部の構造の方向づけを行わないと難しい問題であり,今後系統的なケーススタデイが必要であろう。

長期的な観点から高温産業用の熱源としての太陽炉の位置づけは,将来大きな期待が寄せられるものと考えられ, 本専門委員会において発掘された諸々の課題についても今後の地道な研究が必要と考えられる。 本報告書の内容を公表する際は あらかじめ工業技術院の許可を 受けて下さい。

5

1111

1