

JAERI-Review

95-003



レビュー 「常温核融合」

1995 年 3 月

「常温核融合」検討グループ

日本原子力研究所
Japan Atomic Energy Research Institute

本レポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。

入手の間合わせは、日本原子力研究所技術情報部情報資料課（〒319-11 茨城県那珂郡東海村）あて、お申し込みください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-11 茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費領布をおこなっております。

This reports are issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Information Division Department of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokaimura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-11, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1995

編集兼発行 日本原子力研究所
印刷 ニッセイエプロ株式会社

レビュー「常温核融合」

日本原子力研究所
「常温核融合」検討グループ※

(1995年1月31日受理)

1991年「原子力工業」誌¹⁾で原研として「Fleischmann & Pons の常温核融合」に否定的見解を示して以降現時点までに、大きく分類すると次の4つの動きがあった。即ち、

- ① 通産省が中心になって新水素エネルギー実証研究プロジェクトとして、電気分解法による「常温核融合」研究を開始させた。
- ② 第3回常温核融合国際会議に於いて「常温核融合」を再確認する結果が高橋(阪大)、山口(NTT)の両氏から出され、これに対して「発生した熱は水素吸蔵合金の溶解熱で説明出来る可能性が高い」とする深井氏(中央大)の反論⁴¹⁾が出された。
- ③ 「パラジウムへの重水素吸蔵による常温核融合」を合理的に説明するために必要となる前提の1つ「固体中の多体反応の可能性」を、高橋(阪大)、笠木(東北大)が加速器を使用した実験で示した。
- ④ 既知の科学的知見を否定することなく、核融合反応を実現することを目指した新方法の提案が出て来た。

これらを受けて、本稿では、以下の作業結果を報告する。

- ・総合的な理論面での考察。
- ・通産省が中心になって開始した「新水素エネルギー実証研究プロジェクト」の概要、及び電解法による過剰熱発生の可能性の検討。
- ・特に上記②と③については、常温核融合が実際に起こっている証拠と断定出来るかどうかの検討。
- ・核融合反応を、熱核融合のような大規模な道具立てを用いずに実現する方法の提案の調査。

日本原子力研究所：〒100 東京都千代田区幸町2-2-2

※ 「常温核融合」検討グループの構成員は以下：

立川圓造(東海研副所長、代表)、松橋 達(材料研究部長)、諏訪 武(燃料研究部)、
竹田辰興(炉心プラズマ研究部、現在電気通信大学)、長崎正雅(材料研究部)、
数又幸生(材料研究部)、山内良磨(先端基礎センター)、小沢国夫(堀場製作所)
永井士郎(企画室)、寺田博海(企画室)、瀬崎勝二(核融合計画室)、栗原研一(核融合計画室)

本報告書の執筆分担は以下：

第1章及び第2章：諏訪。第3章：竹田。第4章の4.1節：諏訪。4.2節：長崎、数又。4.3節：山内。
第5章：小沢。文献整理：諏訪、竹田、小沢。第6章及び全体編集調整：栗原。

Review of "Cold Fusion"

The Review Group on "Cold Fusion"

Japan Atomic Energy Research Institute
Uchisaiwai-cho, chiyoda-ku, Tokyo

(Received January 31, 1995)

This review describes the results from the following works:

- (1) to overview the chronological history of "cold fusion" including the International Conferences on cold fusion (ICCF-3 and ICCF-4),
- (2) to overview the various theories which can explain the "cold fusion" phenomena,
- (3) to overview the current status of the experiments to produce anomalous excess heat by electrolysis with palladium electrodes,
- (4) to explain the excess heat phenomena on the basis of chemical heat in hydrogen dissolution to palladium alloys,
- (5) to check the possibility of multi-body fusion reactions in hydrogen-absorbed palladium alloys, and
- (6) to overview newly-proposed ideas to realize nuclear fusion in smaller devices than the magnetic or laser fusion devices.

JAERI presented a view that "cold fusion" using electrolysis with palladium electrodes seemed to show no evidence of nuclear fusion, in the journal of "Genshiryoku-Kogyo (in Japanese)". As a result from this review, JAERI confirms to reach almost the same conclusion as the previously-stated view, while the ideas or experiments to achieve nuclear fusion without contradiction against the knowledge of physics and using small-scale devices should be encouraged.

* Members of the Review Group on "Cold Fusion" are

Enzo Tachikawa, Satoru Funahashi, Takeshi Suwa, Tatsuoki Takeda(*1),
Takanori Nagasaki, Yukio Kazumata, Yoshimaro Yamanouchi, Kunio Ozawa(*2),
Shirou Nagai, Harumi Terada, Katsuji Sezaki, and Kenichi Kurihara.

(*1: The University of Electro-Communications, *2: Horiba Ltd., others: JAERI)

Keywords: Cold Fusion, (Anomalous) Excess Heat, Hydrogen-absorbed Alloy,
Palladium Alloy, Nuclear Fusion, Multi-body Reaction

目 次

1. はじめに	1
2. 「常温核融合」研究の概要	3
2.1 研究の経緯	3
2.2 国際会議の概要	4
2.3 国内の研究開発動向	7
2.4 核融合反応の証拠	8
2.5 実験の分類と結果の特徴	9
3. 常温核融合理論	16
3.1 常温核融合理論の分類	17
3.2 常温核融合反応	19
3.3 微小領域高温核融合(マイクロホットフュージョン)	26
3.4 核融合反応以外の核反応	27
3.5 化学反応および固体物性反応	28
3.6 討 論	28
4. 異常発熱を主現象とする「常温核融合」	31
4.1 電解法による異常発熱(過剰熱)の検証	31
4.2 過剰熱とパラジウム・水素系の物性	39
4.3 多体核反応の可能性	42
5. 核融合反応の実現を目指した新方法の提案	61
5.1 クラスターストリーム利用の核融合	61
5.2 核分裂片、重イオン照射による核融合	62
5.3 強誘電体の相転移に伴うトンネル効果利用	63
5.4 ソノルミネッセンス機構	63
5.5 クラック・モデル機構	63
6. ま と め	65
参考文献	67
付録 ICCF-3及びICCF-4の研究報告リスト	71

Contents

1. Introduction	1
2. Overview of "Cold Fusion"	3
2.1 Chronological History of "Cold Fusion"	3
2.2 Overview of International Conferences.....	4
2.3 Domestic Research Activities of "Cold Fusion".....	7
2.4 Evidences of Fusion Reactions.....	8
2.5 Classification of Experiments and Characteristics of the Experimental Results	9
3. Theory of "Cold Fusion"	16
3.1 Classification of the Theories	17
3.2 The "Cold Fusion" Theories	19
3.3 Micro-Hot Fusion	26
3.4 Nuclear Reactions except Nuclear Fusion.....	27
3.5 Chemical Reactions and Other Non-fusion Reactions in Solid	28
3.6 Discussion	28
4. "Cold Fusion" Phenomena with Anomalous Excess Heat	31
4.1 Evaluation for Anomalous Excess Heat during Electrolysis	31
4.2 Excess Heat and Properties of Palladium-Hydrogen System.....	39
4.3 Possibility of Multi-body Fusion Reactions	42
5. Newly-proposed Ideas to Realize Nuclear Fusion.....	61
5.1 Nuclear Fusion using a Cluster Beam.....	61
5.2 Nuclear Fusion using Fission Fragments or Heavy Ion Beams.....	62
5.3 Nuclear Fusion Based on Tunneling Effect with Phase Transition of Solid.....	63
5.4 Sono-luminescence Fusion	63
5.5 Crack-induced High-voltage Fusion	63
6. Conclusion.....	65
References.....	67
Appendix: List of Presentations at ICCF-3 and ICCF-4.....	71

1. はじめに

「常温核融合」反応成功の報道から5年以上が経過した。一時期鎮静化していた「常温核融合」への関心が1992年10月に開催された第3回常温核融合国際会議を機に、再び高まりを示した。特に我が国において、通産省を中心とした「新水素エネルギー実証技術開発」計画を発表し、1993年12月札幌市に実証ラボラトリー（NHEラボ）を創設し4年計画でプロジェクト研究を進めている。この研究の主要目標は、重水電解法による異常発熱（過剰熱発生）現象が再現性をもって確認できるかどうかにある。さらに、確認できたとしても、「常温核融合」研究に結論をもたらすには、当初から最大の関心事である「過剰熱発生現象は核融合反応に起因するものか、それとも単なる未知の化学反応によるものなのか？」という疑問に答えなければならない。

「常温核融合」反応は一科学分野の研究に留まらず、いまだに社会的な関心事にもなっている。このような時期に現状のレビューを客観的に試みることは困難を伴うが、事実に基づいてレビューし、一定の見解を示すことは意義あることと考えられる。

1991年「原子力工業」誌¹⁾で原研として「Fleischmann & Ponsの常温核融合」に否定的見解を示して以降このレビューを行うまでに、大きく分類すると次の4つの動きがあった。即ち、

- ①通産省が新水素エネルギー実証研究プロジェクトとして、電気分解法による「常温核融合」研究をスタートさせた。
- ②ICCF-3に於いて「常温核融合」を再確認する結果が高橋(阪大)、山口(NTT)の両氏から出され、これに対して「発生した熱は水素吸蔵合金の溶解熱」で説明出来るとする深井氏(中央大)の反論⁴⁾が出された。
- ③「パラジウムへの重水素吸蔵による常温核融合」を合理的に説明するために必要となる前提の1つ「固体中の多体反応の可能性」を、高橋(阪大)、笠木(東北大)が加速器を使用した実験で示した。
- ④既知の科学的知見を否定することなく、核融合反応を実現することを目指した新方法の提案が出て来た。(ICCF-4の発表含む)

これらを受けて、今回のレビューでは、以下の事項を主要目的とする。

- ・総合的に理論面での考察を行う。
- ・通産省が開始した、新水素エネルギー実証研究プロジェクトの概要を述べ、電解法による過剰熱発生の可能性の検討を試みる。
- ・特に上記②と③については、常温核融合が実際に起こっている証拠と断定出来るかどうかを検討する。
- ・核融合反応を、熱核融合のような大規模な道具立てを用いずに実現する方法の提案の調査を行う。

本報告では、第2章では「常温核融合」研究の現状に関する総括的な概要を紹介し、第3章では、「常温核融合現象」を説明するための理論を紹介する。第4章では電解法等による過剰熱発生を主現象とする「常温核融合」について、1991年以降の実験結果とそれを「核融合」で説明しようとするための「仮説」を検討する。第5章では、これまでの科学的知見と矛盾した説明を要することなく、核融合反応の実現を目指した新たな方法の提案について、1991年以降の発表結果を中心に紹介する。1989-1991年については先のレビューを参照して頂きたい¹⁾。最後に、現時点でのまとめを行う。

2. 「常温核融合」研究の概要

いわゆる「常温(低温)核融合、英語ではCold Fusion(以下CFと略す場合あり)」とは、「固体中に高濃度に凝集した重水素原子(D)同士が常温において核融合する」とされる現象をさし、1989年3月末、米国ユタ州にある2つの研究機関(ユタ大学/英国サザンプトン大学の共同研究、及びブリガムヤング大学)から公表された異なった種類の実験事実の端を発するものである^{2,3)}。これ以来、「常温核融合」は「DD核融合による新しいエネルギー生産技術の発見」として、あるいは「従来の核物理の理論では全く説明のできない未知な核融合反応の発見」として関連分野の研究者に加え、各種報道を介して世界中から注目を集めることとなり、世界的な広がりで見られる追試実験と新しい反応系探索のための研究が進められてきた。しかし、莫大な量の追試実験が殆ど失敗に終わったという経過を経て、約1年を経過した時点で、「常温核融合」を取扱った学会での研究報告等は急激に減少した。

日本原子力研究所(以下「原研」と略す)でも、化学部、物理部、アイソトープ部等の各分野の専門家からなる共同実験チーム(代表:立川圓造化学部長)を編成し、反応確認のための実験を行った。そこでは重水(D₂O)電解法、各種乾式法を中心とする方法で、中性子、γ線、トリチウム、過剰発熱等を対象とする測定を試みた。得た結果をもとに、常温でのD-D核融合による過剰発熱は認められない、大量の中性子あるいはトリチウムの発生を伴うD-D反応は認められない、極微量の中性子発生を伴う反応の存否については再現性が悪いことや計測の困難さから断定は出来ない、より幅広い基礎的検討が必要である、等の見解を纏めた^{1,4)}。

その後、追試実験で「常温核融合」を肯定するような結果を得た一部の研究者を中心として、研究が継続されてきた。1992年に入ると新しい実験事実が幾つか公表された。1992年10月21~25日には第3回常温核融合国際会議(ICCF-3)が名古屋で開催され、その時点において「常温核融合」を肯定する実験結果を得ている研究者の殆どが出席して活発な発表、討論が行われた⁵⁾。その後も、それら実験事実を核融合反応で説明するための仮説が提示された。

このような状況の中、通産省は、「新水素エネルギー実証技術開発」プロジェクトという名称で、「常温核融合」実験の組織的な研究開発を開始し、現在進行中である⁶⁻⁸⁾。

2.1 研究の経緯

我が国における主な発表及び原研の活動の推移を記す。過去5年間の研究はPhase 1(1989年3月-1991年7月)とPhase 2(1991年7月-現在)に大別できる(第2.1表参照)。

Phase 1では、主として中性子の検出に主眼がおかれた。その結果、中性子計測の再現性及びバックグラウンド(BG)の除去が不十分なため、確認困難と判断された。一方では、フライシュマンとポンス(Fleishmann & Pons、以下「F&P」と略す)に代表されるように、過剰熱が発生する、大量のトリチウムが生成する、トリチウム生成量

に見合った量の中性子は観測されない等の報告もなされた。

Phase 2では、従来の核物理理論では説明できない未知のD-D核融合反応の仮説が提示され、これを検証するための基礎研究が進められる一方で、新エネルギー生産技術の開発を意識した電解法による過剰発熱現象の確認も行われている。

現在、「常温核融合」研究の焦点は過剰発熱とそのメカニズムの解明にあり、①過剰発熱の再現性条件の探索、②過剰発熱と核反応生成物の相関性、③固体材料の組成・結晶構造等との関連性、④加速器による低エネルギー領域における固体内核反応、等の研究が進められている。

第2.1表 「常温核融合」の主な出来事と原研内の活動

年 月	出来事		
1989. 3	Fleischmann and Pons 発熱、T、中性子	↑ ↓	
〃	Jones 中性子、(0.1~1)/秒		
〃	原研で追試実験開始		
1989. 5	常温核融合に関する討論会 (原研)		
1989.10	日本原子力学会トピカルミーティング		
1990. 3	第1回常温核融合国際会議 (ICCF-1、於：Salt Lake, 米国)		(phase 1)
1990. 4	山口 (NTT)・乾式法 中性子バースト		
1990. 6	高橋 (阪大)・電解法 中性子		
1990.11	イムラ・ジャパン(IMRA JAPAN) 創立 (札幌)		
1990.12	原研追試実験収束		
1991. 7	第2回常温核融合国際会議 (ICCF-2、於：Como City, イタリア)		
.....			
1992.10	第3回常温核融合国際会議 (ICCF-3、於：名古屋)	↑ ↓	
1992.11	原研常温核融合検討会発足		
1992.12	原研第1回CF検討会：池上、高橋、山口らと懇談		
1993. 3	原研第2回CF検討会：最近の動向 (通産省の計画)		(phase 2)
1993.12	新水素エネルギー実証ラボラトリー(NHEラボ) 創設 (札幌)		
1993.12	第4回常温核融合国際会議 (ICCF-4、於：マウイ, 米国)		
1994. 2	新水素エネルギーシンポジウム'94 (札幌)		
(1995. 4)	第5回常温核融合国際会議 (ICCF-5、於：ニース, 仏)		

2.2 国際会議の概要

第3回常温核融合国際会議(ICCF-3)は名古屋で開催(1992年10月)された。この時の報告の内、特にPonsによる「常温核融合反応で水が沸騰する」ビデオ放映やNTTの山口等の「 ^4He を検出した」との発表は、その後多くの論議を呼ぶことになった。

ハワイで開催された第4回常温核融合国際会議(ICCF-4、1993年12月)では、要旨集の発表内容を見る限りIMRA JAPAN (2.3 国内の研究開発動向を参照) からの発表に、新規性が見られる程度で、ほとんど前年の発表の繰り返しであり、大きな進展は見られない。ここでは、両会議の概要の紹介に留める。詳細は付録参照。

(1) ICCF-3⁵⁾

本会議には、「常温核融合」反応に肯定的な実験結果を得ている研究者たちの殆ど全てが集まり(18ヶ国から約340名が参加)、それぞれの成果を発表(137件)しており、

「常温核融合」に関する研究の世界の現状を概ね反映したものと考えられる。会議の中心は電解法による過剰熱発生実験と核融合反応の検証を目的とした核反応実験に関する発表が70件以上であった。この他に、反応理論・モデルに関する発表や物質中の水素(重水素)挙動に関する関連基礎実験結果についての発表があった。

重水電解法による主な研究成果については、第4章に示したのでここでは省略する。NTTの山口等の過剰熱と ${}^4\text{He}$ を同時に検出したとの発表は、D-D核融合反応によりヘリウムが直接出来る反応機構であり、「通常の核融合反応確率からは説明のつかない固体内独特の核融合反応を検証した」ということで注目された⁹⁾。

この会議を通じて、特にエネルギー生産技術としての常温核融合の重要性から最も注目されたのは、「過剰発熱は既知または新規の核融合反応に依るものであるか否か？」という疑問に対する回答である。核融合反応であることを確実にするためには、過剰発熱と中性子、トリチウム、荷電粒子などの核反応生成物の同時発生等の相関性を実験的に見出すことが最も重要と考えられているからである。

しかし、過剰熱発生と核反応とを直接関連付けるデータの内、各種追試に耐えて事実として認知されているものは、これまでのところ一つも無いと考えてよい。むしろ「軽水系での電解法によっても同様な過剰熱の発生が検知された」という新たな実験結果は、核融合反応と過剰熱発生とを切り離して考える必要性を示唆していると言える¹⁰⁻¹²⁾。何故なら、これまで「重水電解系での発熱現象が、軽水を用いた対比実験では観測されない」という事実が、H-H核融合よりD-D核融合の反応確率が桁違いに高いという既知の知見を反映したものと考えられ、常温核融合反応を支持する根拠だったからである。

(2) ICCF-4¹³⁾

本会議では、熱量測定(Calorimetry)、核反応生成物(Nuclear)、理論(Theory)、材料(Materials)の4セッションに分けて発表(約140件)されている。理論・モデルを除いた発表に関する概要を紹介する。理論、モデルに関する発表(45件)に関しては、第3章で紹介する。なお、本会議の論文集はまだ発行されていないため、ここで行うのは要旨(Abstract)からの調査である。

①熱量測定 (Calorimetry)

発表件数は37件で、国別では日本8件、米国18件、その他中国、フランス、イタリア等である。

- (i) 約半数の18件は、従来からのPd-D₂O-LiOD系の電解法による実験である。この内11件は過剰熱の発生があったと報告している。しかし、大部分は高々20-30%程度の値であり、阪大の荒田らによる新型のPd/Pd二重構造カソードを用いた実験だけが、長時間100%以上の過剰熱を観測したと報告している¹⁴⁾。IMRA JAPANの長谷川らはD/Pd比と過剰熱との関係を測定し、高D/Pd(>0.9)は過剰熱発生の必要条件であるが、十分条件でないことを示した¹⁵⁾。過剰熱と核反応生成物を関連づけて発表したのは4件であるが、相関性は明確にされていない。東工大の岡本らは、高橋方式

の電解法で中性子の発生を3回検出したが過剰熱との相関性は得られなかった¹⁶⁾。
Milesらは電解セルで生成した⁴Heを測定している¹⁷⁾。

- (ii) その他の電解法は8件で、5件は過剰熱の発生を報告している。殆どカソード電極を工夫したもので、Ti, Ni, Pdを材料に用いている。Mileyらは25x25x3 mmのステンレス鋼板にTiとPdを交互に蒸着(100Å)した後、表面にCrを60 Å被覆した多層薄膜電極を用いた電解で、2kW/cm³のエネルギーが発生したと発表した¹⁸⁾。米国とインドから各1件、Niカソードを使用し炭酸塩添加の軽水の電解で、"Cold Alkali-Hydrogen Fusion (CAF)"が観測されたと報告している^{19,20)}。また、ZhangらはTi電極を用いて、D₂O-H₂O混合液とD₂O電解液で実験を行い、前者では過剰熱発生は無いが後者では発生したと発表した²¹⁾。
- (iii) その他の実験、装置、データ解析法の提案等11件である。殆ど実験データの記載が無く詳細は不明である。水野(北大)がSrCeO₃型プロトン伝導体を用いて、出力が入力^{7x10⁴}倍得られたと報告している²²⁾。

以上、全体として前回のICCF-3からの進展は少なく、データの再現性を高めるための実験条件の検討、実験装置の改善等(カロリーメータの高精度化、Pdカソード電極の表面処理、Pd以外の電極の工夫)の報告が中心であった。

②核反応生成物 (Nuclear)

発生粒子検出を主とした実験を手法別に分類すると、電解法10件、放電・高压印可法9件、加速イオン法6件、熱サイクル法4件、その他(粉碎法、ガス吸蔵法、相変化法等)11件である。ICCF-3以前からの継続実験の経過報告が殆どであり、中性子(n)、トリチウム(T)、荷電粒子(ヘリウム(⁴He)、プロトン(p))、X線、γ線の放出の有無及びエネルギー測定を行っている。

加速器を用いた研究では、阪大の高橋らによるTiに243keVのDを打ち込み7.3MeV付近に異様なピーク(He, p)を観察し3体融合モデルとの関係を議論した発表²³⁾、東北大の笠木らによるTiD_xに150keVのD⁺を照射してD+D+D→p+n+⁴Heを示唆する発表²⁴⁾、東北大の勅使河原・茅野らによるTiD_x(X=1.9)に90MeVのIを照射しnを検出した発表²⁵⁾、等がある。

鉄やストロンチウム等を検出した報告もあるが^{19,26)}、これらについてはより慎重な検討が必要であろう。目新しい報告としては、Lipsonらによる超電導体物質YBa₂Cu₃O_{7-x}を用いたn及びTの検出及びKD₂PO₄単結晶のような単純な系を用いてキュリー点の前後で温度振動を行い結晶格子変形を繰り返し、中性子放出を観測している²⁷⁾。一方、その対比実験として行われたKH₂PO₄単結晶ではBGレベル以上の中性子は観察されていない。

③材料 (Materials)

材料に係わる研究分野の成果報告数は21件で、それら要旨の内、IMRA JAPAN 関係所属研究者から、発熱量測定と共に常温核融合研究の指標となるD/Pd比の測定結果が報告された²⁸⁾。これはIMRA JAPANが開発したガス拡散電極を用いる電解系を使用した成果であろう。AkitaらのPd-Rh合金中でD/Pd比が1.0となったこと、さらに

Kubotaらの金コーティングしたPd電極中でのD/Pd比がコーティングしないものに比べて高いということ、等が明らかになった点が特記出来る。その他興味深い研究として、Hugginsらの電極中のD₂の不均一分布に関する報告²⁹⁾、Okamoto³⁰⁾、Liawら³¹⁾らの溶融塩を電解質溶液として用いる研究、Celaniらのパルス電解法を試みた研究³²⁾、Dashらの硫酸酸性溶液中での電解において過剰発熱及び電極の部分溶融を確認したこと³³⁾等が挙げられる。

以上から、要旨のみの評価で内容の詳細は検討できないものの、「常温核融合が起こっているかどうか」という最も基本的な疑問点には、ICCF-4でも答えは得られていない。

2.3 国内の研究開発動向

反応機構の解明或いは再現性のある過剰熱発生反応の探索のための研究が続けられている。ここでは、(1)通産省の新水素エネルギー実証ラボラトリー、(2)IMRA JAPAN、(3)大学、産業界等、に於ける最近の研究動向を以下に示す。

(1)新水素エネルギー実証ラボラトリー(NHE ラボ)^{6,8)}

新水素エネルギー実証技術開発は、通産省からの資金的補助を受け、新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)が1993年度(平成5年度)から4年間の予定で財団法人エネルギー総合工学研究所(IAE)に委託して実施している。IAEでは札幌にNHEラボを設置して実証試験を行っている。

NHEラボ(1993年(平成5年)12月1日創設)は、現在プロジェクト・マネージャーと5名の研究員で構成されている。実験内容は、IMRA JAPANのガス拡散電極を用いる方法(I/J方式)、フライシュマン・ポンズによる方法(F/P方式)、の2方法を採用し各々電解セル6個を用いて過剰発熱量の確認実験を行っている。基礎実験のため、電解セルは100ml程度と小型である。1994年(平成6年)2月になって本格的に実験を開始した段階であり、結果はまだ公表されていない。

事業の主目標は、過剰熱発生が確実に起きていることの確認であり、事業概要は以下の通りである。

①事業全体計画

過剰熱発生実証モデル実験、材料解析及び材料開発、情報収集・整理、

国際研究協力: Electric Power Research Institute (EPRI), Stanford Research Institute(SRI)

②実証研究計画

・実証技術開発: NEDOの事業を受託、4年間30億円

・基礎研究支援: 民間企業(20社)から受託

1993年度は全国8大学を支援(北大、東北大、東工大、東京農工大、横浜国大、名古屋大、阪大、長崎大)

③基礎研究計画

・本計画は民間企業の資金で成立

- ・ 目標：新水素エネルギーに関わる諸現象を科学的に解明し、新水素エネルギー実証研究に学術的基盤を用意すること
- ・ 研究班の研究課題（班代表者）
 - 〔第一班〕電気化学反応系における過剰熱の検出と計測技術評価（横浜国大 太田健一郎）
 - 〔第二班〕核生成物と過剰熱の相関（阪大 高橋亮人）
 - 〔第三班〕核反応機構解明への核物理的アプローチ（東北大 笠木治郎太）
 - 〔第四班〕新水素エネルギー用材料開発（名古屋大 岩原弘育）
 - 〔学識経験者〕増本健、池上英雄、上田良二、坂本芳一

(2) IMRA JAPAN

IMRA JAPAN (Institute of MINORU Research Advancement) では、酸素発生を起こさない水電解法による D_2 加圧式の新型電解セルを開発し、再現性ある過剰熱発生を得るための条件の探索と反応制御法に関する検討が精力的に行われている。本研究開発については第4章で詳細に紹介する。

(3) 大学等

主な研究グループは、前述した「新水素エネルギー実証技術開発」プロジェクトの基礎研究支援に参加しているので省略する。また、産業界では三菱重工を筆頭に東京電力、日立、東芝等日本を代表する企業が大学等の基礎研究支援に参加している。

2.4 核融合反応の証拠

過剰熱が発生するかどうか？もし過剰熱であったとして、そのエネルギー源は核融合反応かどうか？このような2点が「常温核融合」実験の評価の際、常に議論になる。前者は、精度の良い熱量測定を行うことにより可能であろうから、それを待つことになる。後者は、核融合反応の証拠が検出されて初めて確認出来る。これまでの実験報告では、既知の物理的法則と矛盾しない論理的整合性のとれた証拠の提示は殆ど無い。「核融合による熱の発生」や「核反応生成物を検出」という実験でも、放射線が検出されないというような、不可解なものが多い。ここでは、もし核融合反応が起こっているとすれば、どういう証拠が確認されなければならないかを整理することにする。

核融合反応が起こった場合、質量欠損の結果生じた1 MeVを越えるエネルギーが反応生成物の粒子の速度として付与される。この粒子がそのまま系から飛び出して来るか、もし、固体中から外に出ることが出来ない状態では、高速粒子が固体構成粒子に衝突し大きく減速され、その際持っていたエネルギーの一部を放射線(X線等)の形で放出する。それらは固体に吸収されず外に出るか、新たな核反応を起こして別の放射線に変換される。従って、バックグラウンドに比べ有意な量の(所定のエネルギーの)核反応生成物、2次的核反応生成物又は高エネルギーの放射線(X線等)の検出により、核反応の有無が判ることになる。勿論、高エネルギーの核反応生成物を検出する代わりに、それらが減速されたものを質量分析器や化学反応等を用いて

検出することも考えられる。

具体的には、3.1節の(3.1)、(3.2)式で表した反応、或は通常確率的には極めて低いと考えられている(3.3)式で示したような反応の1次生成物である中性子(n)、トリチウム(T)、陽子(p)、ヘリウム同位体(^3He , ^4He)、X線、である。さらに、2次的な核反応の生成物も考えねばならないが、量的には1次反応生成物に比べ相当小さくなることが想定される。さらに、D-D反応の分岐比がこれまでの知見と一致するかどうかは、明らかではないが、分岐比がこれまでと大きく異ならなければならない理由も特にない。分岐比とそれに伴う発生エネルギーがこれまで通りであれば、以下が予測される。即ち、

- ・ 過剰熱1ワット(1W)に相当する核融合反応では約 10^{12} 個の中性子が発生する、
- ・ 中性子とトリチウムの生成量は同数 ($T/n=1$)である。

2.5 実験の分類と結果の特徴

今回の研究の発端となった実験系が重水電解法によるものであったため、当初この新現象は「電解核融合反応」とも呼ばれていた。しかしその後、気相から固体中に重水素を導入することによっても同様な現象が起こり得ることが示されたため、これらをまとめて「常温核融合現象」と呼び、前者を電解法、後者を乾式法、あるいはガス法、真空法等と称するようになった。さらに、提案された乾式法には次の幾つかの異なった方法が提案されている。即ち、冷却・昇温サイクル法、グロー放電法、拡散制御法、乾式電解法、等である。これらは固体中に充填された重水素の非定常状態を強制的に作り出す際の手法の違いである。

以上のような様々な装置を用いて行われた実験において、現在までに得られた結果の内、常温核融合反応を支持する実験結果の特徴は、次の4点が挙げられる。

- ① D/Pd比が0.8-0.85以上で化学反応では説明出来ない過剰熱が発生する。
- ② 核反応生成物が検出される。しかし、過剰熱と核反応の相関性は認められない。
- ③ D-D反応の分岐比が理論値と大きく異なる ($T/n \gg 1$)
- ④ 反応確率が従来の理論に基づく予測値より50桁程度大きい。

しかし、いずれの実験においても再現性よく得られる条件は明確になっていないことが共通している。さらに、常温核融合を肯定する研究者も従来の理論では説明不可能であることでは認識が一致しており、3体反応等の新しい仮説の提案がなされているが、理論の検証は今後の課題である。

ここで、DD核間距離⁴¹⁾について触れておく。面心立方格子(FCC)をなすPd結晶中に吸蔵されるDは、八面体格子間位置にランダムに入る。全ての八面体格子間位置がDに占有された場合、その吸蔵率はD/Pd=1となり、Dの平均核間距離は0.285nm(2.85Å)となる。更に、八面体及び四面体格子間位置全てにDが占有されたとするとD/Pd=3となるが、核間距離は0.137nm(1.37Å)であり、D₂分子の核間距離0.074nm(0.74Å)の約2倍である。また、Jones等が報告した程度のD-D核融合反応が観測されるためには、0.015nm(0.15Å)に近づく必要がある。

例えば、Myersらは加速器を用いてD/Pd=1.6の重水素化物を得たが、核融合反応を確認出来なかったと報告している¹⁹⁾。

上記のことから、定常状態では固体内で有意のDD核融合反応が起こるほどにDD核間距離を近づけることは出来ないことが明らかである。従って、常温核融合反応の研究者達は相転移や結晶内格子欠陥等なんらかの非定常状態を作りだす方法を模索する研究を進めている。

(1) 過剰熱

電解法における電気入力（ジュール熱量）と熱出力との差が過剰熱量である。最近では熱測定精度が上がったために、初期のような大量の過剰熱発生報告例は少なく、殆ど数十%以下である。また、再現性を得るための実験条件も第2.1図～第2.4図に示すように次第に明らかにされつつあり、以下の条件が挙げられている。

①過剰熱の発生は、D吸蔵量及び電流密度に臨界値が存在する。

$D/Pd \geq \sim 0.85$, $i \geq 200 \text{ mA/cm}^2$ (IMRA JAPAN等)

②固体中でのDの非定常状態の形成が有効である。

高/低電流密度電解法で過剰発熱（阪大・高橋）

③表面処理あるいは合金化したPdを使用すると高D/Pdを達成できる。

Pd-Li (1%) 合金、Pd-Rh(10%)合金（北大・水野、IMRA JAPAN）

④過剰熱の発生には、ダイナミックな状態が必要である。

高D/Pd(>0.9)だけでは不十分（IMRA JAPAN等）

これらの過剰熱発生に懐疑的な立場からは、熱測定装置の精度及び解析法に関する疑問点が指摘されている。F&Pらは、当初セルからの熱損失は全て熱伝導によるものと述べていたが、その後の解析では100%輻射によるものと仮定している³⁴⁾。また、過剰発熱をD-D核融合反応に帰する根拠が希薄であり、過剰発熱と核反応生成物との相関性が無いことが挙げられる。Mckubreらは高D/Pd化により、再現性良く過剰熱発生が達成できると主張してきたが、最近では高D/Pd化は必要条件に過ぎないことが明らかになってきている¹⁵⁾。

また、Baranowskiらの乾式法による高圧下でD/Pd>0.9を達成した実験においても、過剰熱の発生は認められなかったとの報告がある³⁵⁾。更に、高圧下のP-C-T曲線から求めたPdへの水素溶解時の発熱量 ΔH とD/Pdの関係から³⁶⁾、 ΔH はD/Pd<0.8以下における値(約17 kJ/mol)に比較し、D/Pd>0.9では約20-100 kJ/molに増加することから、未知の化学反応による発熱の可能性が挙げられている^{37, 38)}。

(2) 核反応生成物^{39, 40)}

常温核融合の報告が最初に行われた当時は、電解法による過剰熱発生の確認実験と同時に核融合反応を検証するための核反応生成物の検出実験が多数報告された。しかし、最近核反応生成物の検出実験は減少している（高橋、岡本、Miles等が進め

ている)。また、常温核融合は固体内核融合反応であるとの観点から加速器等を用いて種々のエネルギーを持ったイオンの衝撃による常温核融合のメカニズム解明研究が高橋、笠木等によって進められている。これらDの金属重水素化物中での核反応に関する研究は、本来常温核融合とは切り離して核物理上の問題として取り上げるべきものと考えられる。従って、ここでは従来の電解法を中心とした結果について記す。

i) 中性子

- ・非常に弱い中性子が発生する。Kamiokandeでの実験により極めて微弱な中性子を検出した。(東大神岡、日米共同実験)
- ・DD反応の証拠である2.45 MeV中性子が発生する。高エネルギー成分(3~7 MeV)もある。(北大・水野、阪大・高橋)

[問題点]

- ・電氣的ノイズの除去には対処しているが、宇宙線及び周囲からのBGに対する対応は不十分である。また、再現性が無く、ラドン等に対する評価が不十分である。BG放射線によっても高エネルギー成分が発生するという反論もあり、従来のデータからは中性子の発生に関する確証は得られていない。

ii) トリチウム

- ・トリチウムが大量に発生する。(Texas A & M・Bockris、青学大・松本)
- ・トリチウム発生量/中性子発生量の比が1よりはるかに大きい($T/n=10^3\sim10^9$)。

[問題点]

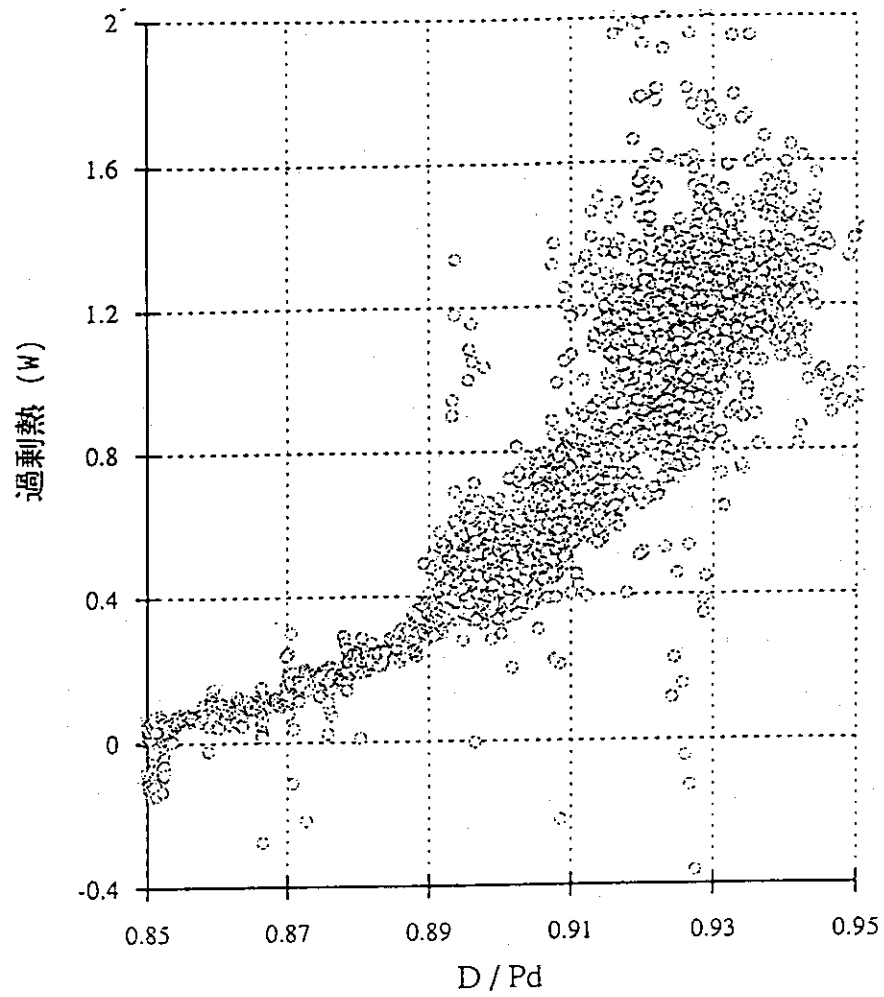
- ・電解に伴うトリチウムの濃縮効果、BGに対する検討が不十分である。

iii) 荷電粒子

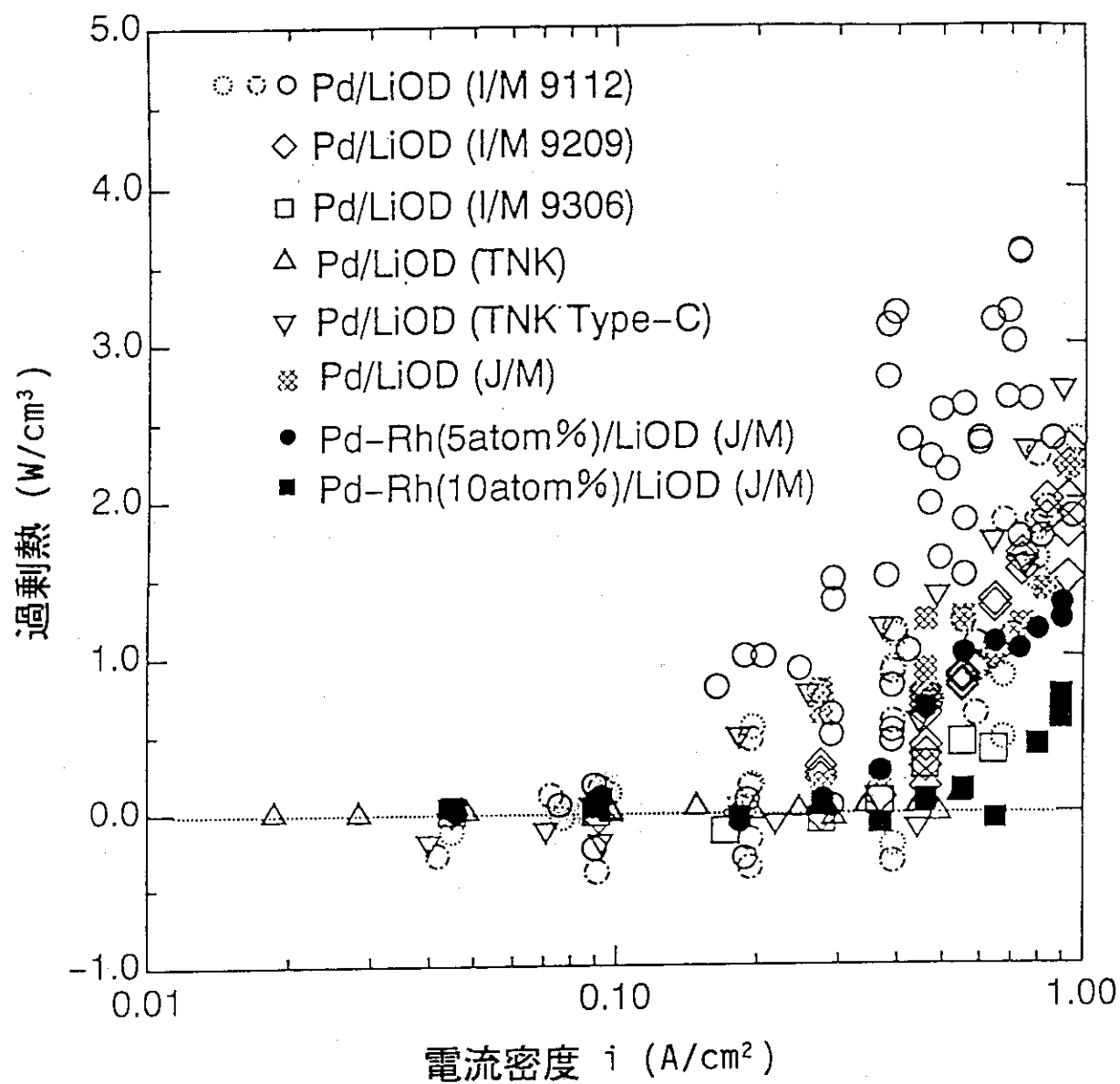
- ・D吸蔵-熱サイクル法で ^3He 、 ^4He を検出した($\sim 10^6$ atoms)。(阪大・坂口)
- ・乾式法で ^4He を検出(他にSSDによりp, α 粒子も検出)した。(NTT・山口)

[問題点]

- ・ ^3He 及び ^4He 発生に伴うべき中性子及び γ 線が検出されていない。また、実験装置に、空気中からのHe汚染の原因となるガラス窓が使用されている。これまでに、Pons, Milesらによって ^4He の検出が報告されたが、Ponsらはその後この発表を撤回している。



第2.1図 過剰熱発生と重水素充填率D/Pdの関係⁴⁹⁾

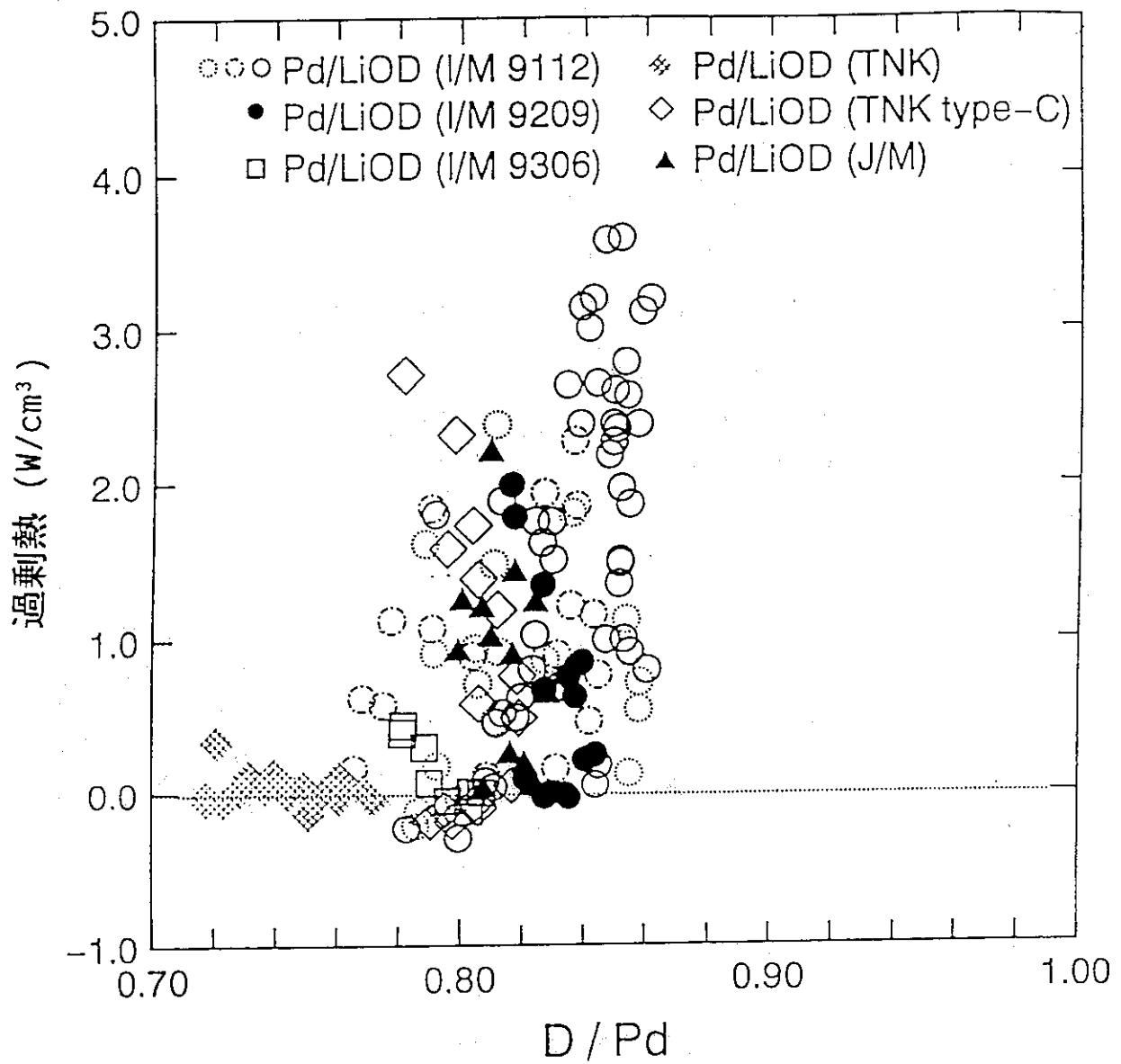


第2.2図 種々のメーカーで製造したPd及びPd/Rh陰極/重水

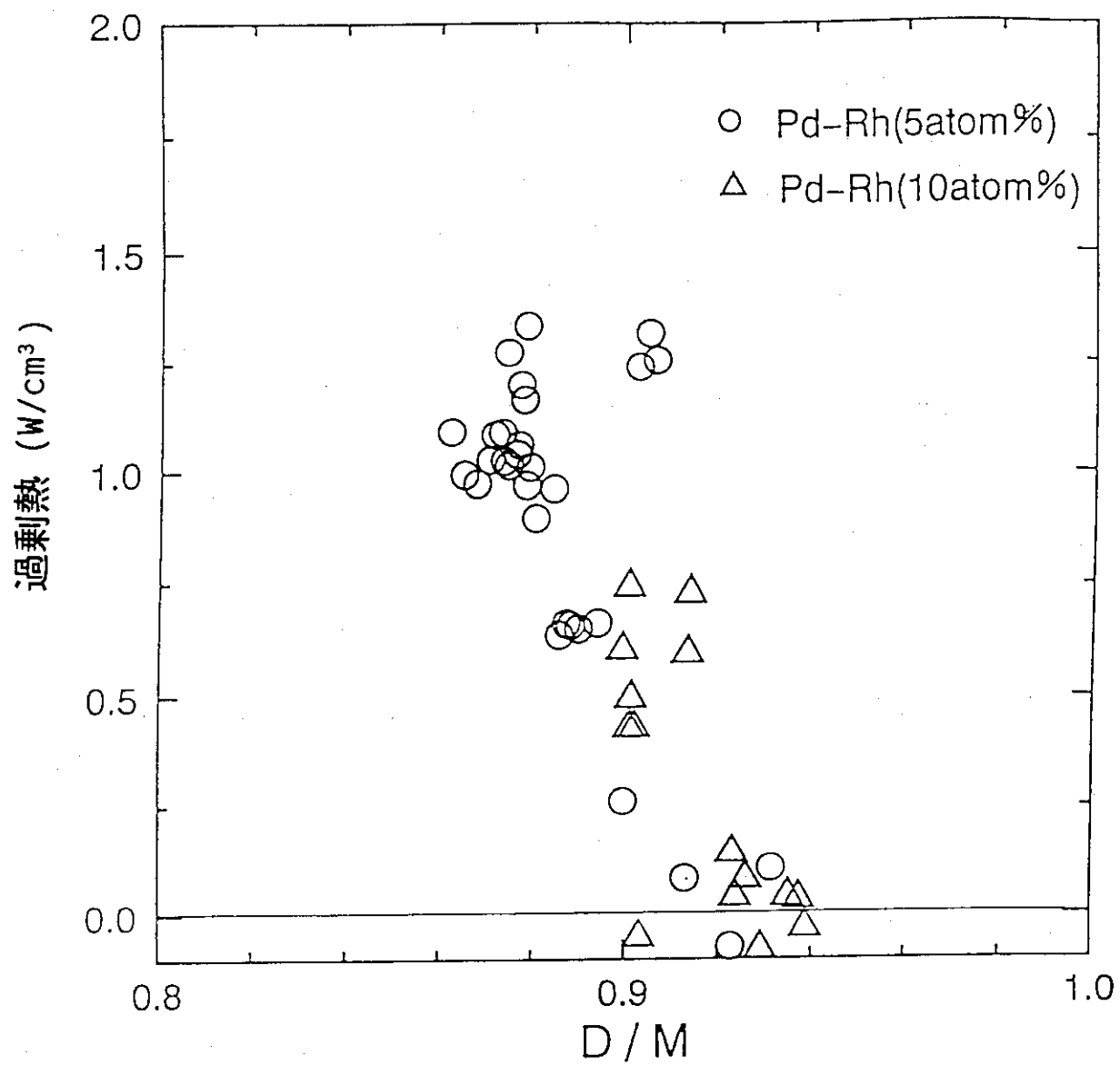
電解法における過剰熱と電流密度の関係(1M LiOD)¹⁹³⁾

I/M: イムラ・マテリアル, TNK: 田中貴金属,

J/M: Johnson matthey



第2.3図 種々のメーカーで製造したPd陰極/重水電解法における過剰熱と重水素充填率D/Pdの関係(1M LiOD)¹⁹³⁾



第2.4図 Pd/Rh陰極/重水電解法における過剰熱と重水素充填率D/Mの関係(1M LiOD)⁽¹⁹³⁾

3. 常温核融合理論

前章の冒頭でも触れたとおり、Fleischmann & Ponsの実験²⁾およびJones等の実験³⁾によって「常温核融合現象」が知られて以来5年以上の歳月が経過したが、この現象が果たして核融合反応であるのかどうかという最も本質的な点については結論が出ていない。公表されているそれぞれの実験において「常温核融合現象」という言葉の正しい定義は必ずしも明確ではないが、ここでは「常温核融合現象」とは、水素吸蔵金属に何らかの方法で水素同位体を吸蔵させるとき、その吸蔵の段階で、あるいは吸蔵後に通電や加熱等の操作の結果起こる、次のような現象であるとする。

- ・ 過剰熱の発生
- ・ 核融合生成物と考えられる物質の発生
- ・ 過剰熱と核融合生成物と考えられる物質の発生

現象の再現性が悪かったため、これらの「常温核融合現象」自体存在することに疑問が出されたが、最近では条件次第でこれらの現象が実際にある程度の再現性で観測されることは認められつつある。しかし、これは必ずしも「常温核融合」と呼べる核反応の素過程が存在することを示すものではないことに注意しなければならない。

「常温核融合現象」のメカニズムを理論的に説明しようという試みは今まで多数なされてきた。これらの全体についてサーベイし評価するのはきわめて困難である。特に、実験的にもまだ確定的なことが言えず、また、それぞれの理論においても殆どの場合容易に受け入れ難い仮定や推測が含まれているため、直ちには理論の正当性を認めることができない。

「常温核融合現象」のメカニズムを説明しようとする理論において、考えられる素過程は次の3種の反応に分類するのが便利である。すなわち、①核融合反応、②核融合反応以外の核反応、および③化学反応や固体物性反応、である。常温核融合が注目されるのは、低温において有意な量の核融合反応が進行していることが期待されるためであって、この意味から①の核融合反応、特に本来の意味での「常温核融合反応」の理論的解明とそれを踏まえた実験的検証が最も強い興味を引く。しかし、このような反応について数多くのモデルが提案されているにも係わらず、殆ど全てのモデルにおいて、仮定が証明されずに使われていたり、既存の理論との矛盾を十分に説明できなかったりしており、推測あるいは思い付きの段階を出ていないと考えられる。

これに対して、『「常温核融合現象」は「常温核融合」によるものではない』という考え方は常識に合致していて受け入れ易い。このような考え方の例として、深井⁴⁾は、有意な量の常温核融合が起こる目安として0.015nmのDD核間距離を考え、一般にこの核間距離のクーロン力を支え得るような結晶格子は存在し得ないこと、過剰熱の重水素濃度依存性が溶解熱のそれと類似であること、および中性子計測データのバックグラウンド依存性が強いこと等を根拠に、「常温核融合現象」は「常温

核融合」に基づくものでないことを示唆している。

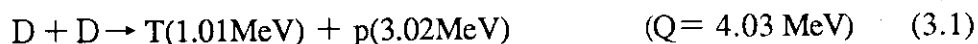
今まで提案された理論についてのいくつかのレビュー⁷⁶⁻⁷⁸⁾が存在する。これらレビューが行われた1991年から本レビューまでの間に、基本的に新しい理論はほとんど出てきていないように思われる。ただし、1991年のレビューに際しては過剰熱についての理論はあまり詳しく取り上げなかったが、最近の実験では核反応生成物よりも過剰熱の発生の方が注目されており、理論的研究でもこれを含めた「常温核融合現象」を説明する努力がなされている。

ここでは、このような傾向にしたがって、文献[78]のレビューを基にして必要な点を補足しつつ現在までの理論の展開を総合的にまとめる。ここに示す理論のほとんど全ては常温核融合研究が始まった当初から提案されていたものか、あるいはその延長であるが、残念ながら上に述べたように十分説得力のある完成度の高い理論は見い出せない。特に重要なことは、ここで取り扱う理論は、「常温核融合の確からしいメカニズムとして評価されたもの」ではないということである。「常温核融合現象」を説明するために提案された理論の中でも、特に「常温核融合」を実在のものとして捉えている理論はまだ未完成であり、そのほとんどは完成されずにやがて消えていく可能性が高いが、一部は今後の常温核融合理論の展開におけるヒントを与えるものとして捉えることができる。このような観点から、本章では個々の理論については敢えて厳しい評価は行わず、出来るだけ広範囲の考え方について述べるよう留意した。

3.1 常温核融合理論の分類

まず、重水素同士の核融合反応が起こるための、素条件を考える。原子核同士はそれぞれ正電荷を持っているため、クーロン反発力によって反発し合う（クーロン障壁）。この反発力を越えて2個の原子核同士を近付け核融合反応を起こさせるためには、それらの原子核がクーロン障壁を乗り越えて、反応が起こる核間距離（ $10^{-12} \sim 10^{-14}$ m）まで近付くことが必要である。第3.1図に示すように重水素原子核ではその障壁の高さは約0.3 MeVであり、これは30億度の温度に相当するエネルギーである。従って、核融合反応を実現させる現時点で最も有望な方法は、原子核の集団を十分高温に加熱して、反応断面積の大きな高エネルギー粒子を有効に利用する熱核融合の方式ということになる。この場合、約1億度（約10keV）の十分高い密度のプラズマを十分長い時間閉じ込めることが必要になる。

核物理の理論によれば、0.074 nmの核間距離を持つ重水(D₂O)分子内の核同士が室温付近で下記の核融合反応(3.1)或いは(3.2)を起こす確率は毎秒 10^{-74} 程度と見積もられている。また、下記の反応(3.1)、(3.2)、(3.3)の分岐比は1:1:10⁻⁷である。



一方、パラジウム(Pd)、チタン(Ti)、及びそれらの合金等は水素吸蔵合金と呼ばれ、重水素を大量に吸蔵する性質をもっている。その吸蔵量は時には固体容積の1000倍程度にも達する。従って吸収された重水素の密度は固体重水素と比較しても十分に高い状態になっており、さらに重水素は固体内でイオンとして存在すると考えられている。この時の固体中におけるDD間距離は0.2-0.3 nmと見積もられているから、反応(3.1)-(3.3)の核融合反応は現実には起こり得ないと考えられる。

しかし、このようにして固体中に凝縮された重水素が、ある条件下において互いに衝突し合ったり、また固体特有の何等かの理由で、クーロン障壁が遮蔽され重水素の原子核間距離の短縮が起こるかもしれない。もしこのような状態になれば、常温においてさえ、ある確率でD-D核融合反応が起こることは十分想定し得る。このような可能性を理論的に考えるのが、常温核融合理論ということになる。

これまでは、ミューオン触媒核融合の場合を除いては、常温に近い温度では事実上有意な量の核融合は起こらないとされてきた。しかし、Jones等によれば「常温核融合」において反応確率は 10^{23} s^{-1} と報告³⁾されており、この値は理論値より50桁も高く、このような反応確率は従来の理論では説明できないものである(第3.1表)。

第3.1表 固体内における核融合反応の確率

状態	距離(nm)	反応確率(s^{-1})
D-D (気体)	0.074	10^{-74}
D-D (ミューオン触媒核融合)	0.00035	10^{11}
D-D (固体中)	0.2-0.3	???
Jones の結果	(0.015)	10^{23}

ここで、常温で核融合反応がどの程度起こるのかを知るために、外挿により低温側での反応断面積を求めると、仮に粒子のエネルギーが(常温よりはるかに高い温度に相当する) 1 eVであっても通常の条件のもとでは核融合反応は事実上起こりえない程小さな値になることがわかる。ところが、「常温核融合現象」が「常温核融合」によるものであるとするならば、今まで考えられなかったような低温で核融合が起こるのみならず、その反応には従来の常識に反する際だった特徴があると考えざるを得ない。このような常温核融合反応が存在することを証明し、そのメカニズムを明らかにするには、特に次の2点が理論的にも説明されなければならない。即ち、

- ①自由粒子同士の衝突では起こりえないような低エネルギー領域で、金属結晶中ではどうしてクーロン障壁を超えて核融合反応が起こり得るのか?
- ②DD核融合と考えられている常温核融合実験で、熱の発生が核融合生成物の発生に比べて極端に多く、すでに確立している分枝比と矛盾する場合があるのはなぜか?

「常温核融合現象」は本当の「核融合反応」が起こった結果観測される現象とする場合は、これをさらに2つの場合に分類することができる。即ち、

- (a) 金属結晶中の特殊な条件下では低温でも実際に核融合反応が起こるとする場合でこの現象が本来の意味での「常温核融合」である。
- (b) 固体中で実質的に高温核融合(高エネルギー粒子による核融合)が起こる場合である。

前者(a)は、さらに以下に分類される。

- (i) 何らかの理由で金属結晶中のクーロン障壁が遮蔽され核間距離が短くなる場合、
- (ii) 高圧・高密度の条件の下に核間距離が短くなる場合、
- (iii) 負電荷の重い粒子によって電子が置換され核間距離が短くなる場合、
- (iv) 量子力学的な共鳴によってトンネル効果を増大させて核融合反応の確率が大きくなる場合、
- (v) コヒーレントな相互作用による場合、
- (vi) 多体反応による場合、

一方、後者(b)は、

- (i) フラクトフュージョン(Fracto-Fusion)、
- (ii) ソノフュージョン(Sono-Fusion)

を代表とするもので、まとめて、極小領域での高温核融合（マイクロホットフュージョン(MHF: Micro-Hot Fusion)）と呼ばれることがある。

3.2 常温核融合反応

常温核融合反応としてまず考えられるのは、この反応がミュオン触媒核融合と同様クーロン障壁の遮蔽による核間距離の短縮というメカニズムで起こる可能性である。ミュオン触媒DD核融合では、重水素分子を構成する電子の一つがその207倍の質量を持つミュオンに置換されることで、核間距離が通常の分子の0.74 Åから0.0035 Åまで縮まって核融合反応率が著しく増大する。普通のDD核融合が常温で起こる速さはDD対当たり 10^{-74} s^{-1} であるのに対して、ミュオン触媒DD核融合ではこの値は 10^{11} s^{-1} にも達する(第3.1表参照)。この場合、重い負の粒子の存在でクーロン障壁の遮蔽が起こり核間距離が約1/200に減少したことで、まさに反応率が85桁も増大したことになる。一方、Jones等の中性子測定実験の結果³⁾によれば常温DD核融合の反応率は 10^{-23} s^{-1} 程度になるので、電子がある程度重い粒子と置換される可能性あるいは反応に当たって電子が実効的に重い粒子のように振る舞うメカニズムが存在するならば実験値は簡単に説明できることになる。ただし、この時起こるのは普通のDD反応であるから、このモデルだけでは、多量の過剰熱発生現象を初めとする「常温核融合現象」と呼ばれている現在の実験結果を定量的に説明することはできない。

このような考え方に基づく計算が、最初、Rafelski等によって行なわれた⁷⁹⁾。この計算ではまず二つの重水素核を球の中に閉じ込めた状況を考え、球の半径 R_{max} を変化させることで核融合反応率の核間距離依存性を示した。重水素系をボーア半径($a_0=0.529 \text{ Å}$)の0.3倍の半径を持つ球の中に閉じ込めることで 10^{-24} s^{-1} の反応率を達成できることがわかる。さらに、電子を重い粒子に置換した場合、電子の電荷を大きく

した場合、及びこれらを組み合わせた場合について核融合反応率の計算を行なっている。Rafelski等は、このような実効質量、実効電荷、及び狭い空間への核の閉じ込めを考えることは非現実的であるとしながらも、DD核融合反応率が物理常数や周囲の条件に極めて敏感であることを認識することの重要性を指摘している。同様の計算は、他の著者等^{80,81)}によっても行なわれている。上村は、DT、pD核融合について電子の実効質量を変化させて核融合反応率の計算を行なった。実効質量の小さな場合、質量の小さな核同士の反応における大きなトンネル効果の影響がはっきりと見られる結果を与えている⁸⁰⁾。この考え方に基づく常温核融合の理論を完結させるために、具体的にクーロン場の遮蔽を実現する可能性として次のようにいくつかの場合が提案された。これらの理論のみで異常な分岐比まで説明することを目指したものと、異常な分岐比の説明には他のメカニズムをも考慮しなければならないものがある。

(1) 金属結晶中に形成されるポテンシャルとクーロン障壁の遮蔽

常温核融合実験の結果について素朴に考えるならば、金属結晶中では自由空間とは異なった何らかの原因が存在してクーロン障壁の遮蔽が起こっているのではないかという考えに至る。上の議論からわかるように、D-D分子の周りの電子の質量が実効的に大きくなったりあるいは質量の大きな負の粒子が実際に存在することを仮定することで、クーロン障壁は遮蔽されてD-D原子核の核間距離が小さくなり、観測されている程度まで核融合反応率を高くすることは可能である。しかし、このような状況をもたらす実際のメカニズムは今のところ見つかっていない。そこで、実効質量や仮想的粒子に依存しないでクーロン場が遮蔽されるメカニズムを探さなければならない。このような観点から多くの研究が為された^{139,170)}。近藤⁸²⁾及びVaselli等⁸³⁾は、重水素凝縮系のThomas-FermiモデルあるいはPd金属中の重水素プラズマのDebye遮蔽を考えて核間距離が通常の分子の場合より短くなり核融合反応率が大きくなり得ることを示した。Pdは、その体積の約1000倍にも相当する重水素分子を吸蔵するが、その時、分子は原子に解離し、さらにイオン化して裸の原子核になっているものと考えられる。イオンは、その周りに電子を集めることでクーロン場は遮蔽される。このモデルによる計算で、密度 n を $6.8 \times 10^{22} \text{ cm}^{-3}$ とすると、遮蔽距離として $0.57 \text{ \AA}$ が得られる。通常の D_2 分子の核間距離 $0.74 \text{ \AA}$ に比較して、この距離は余り小さくは見えないが核融合反応率の増大には大きな効果を持つ。金属中の重水素をプラズマと考えてフェルミ温度に対するデバイ遮蔽距離を求めれば、全く同じ結果が得られる。このような状況で核融合反応率は大幅に増大するが、現在報告されている常温核融合の実験結果を説明することはまだ不可能である。このような条件に加えて、非平衡状態の存在、温度・密度の揺動その他の要因が必要とされている。このような考え方の延長にある研究が、PdあるいはTi結晶中にDが存在する場合のポテンシャルを正確に取り扱い、Dのs電子と結晶のdバンドの電子の結合によるクーロン遮蔽効果や水素の多体相関効果を取り入れた計算^{84,85)}である。いずれもポテンシャルのわずかな

変化が反応率に大きな変化をもたらすことに着目したものである。

しかし、現在では、結晶中のD核の核間距離は D_2 分子の中での核間距離より短くはないというのが定説であり、Sun & Tomanekによれば結晶中に D_2 分子をおいてもその核間距離は自由空間の分子に比べてむしろ増大することが示された¹¹⁵⁾。

非平衡状態が重要な役割を果たす現象として、格子中にできる照射欠陥における核融合はFedorovichによって検討された^{86, 87)}。 ^3He , ^6Li , ^7Be , ^{10}B 等の水素化物の結晶中で熱中性子を吸収し、これらの原子はp, T, p, ^4He を放出する。反応生成物は電子の分布が変化するよりも速く逃げ去るので電子が過剰になった領域(E-cellと呼ぶ)ができる。高压状態でE-cellが持続して正のポテンシャルの遮蔽効果が増して動的状況で核融合が起こる。しかし、この理論は定性的で推測の域を出ていない。また、この理論では、Fedorovichは格子中の水素同位体はプラズマ状態にあると考える⁸⁸⁾。この場合密度が高く、温度が低いほうが遮蔽効果が大きい。ガス・プラズマでは温度を下げると自由電荷が減少するので、高密度、低温度の完全電離気体は格子の外では実現しない。格子中で、初めて検出可能な核融合反応が起こりうるとしている。欠陥の生成過程においてD核同士が近づいて反応が起こるという理論は他にも提案されている¹⁷¹⁾。Tabet & Tenenbaumは、相変化にともない熱的不安定性が起こり球状領域が崩壊して核融合反応が起こるという動的モデルを提案した¹⁷²⁾。条件が良ければ実験結果が説明できるとしている。

(2) 高压下・高密度下核融合

高压下で、クーロン障壁が変形して核間距離が短くなり核融合反応が起こりやすくなるという考え方は、常温核融合の提唱者の一人であるJones等の実験開始の動機である⁸⁹⁾。Jones等は当初、地球物理学的対象における核融合現象に関心を持ち、高压下核融合 (Piezonuclear fusion) の仮説を立てて実験を開始したと言われている。数万乃至数十万気圧の高压下で D_2 分子の形は変形し、分子は原子に解離するが、ポテンシャルの形は更に変わり、核間距離を短くする。一方、ダイヤモンド・アンビルによって537kbarまでの高压をかけた D_2 分子からのラマン・スペクトルを観測し、クーロン・ポテンシャルの圧力依存性の経験則が得られている。このポテンシャルを使ってシュレディンガー方程式を解くことで、分子内の平衡核間距離が求められる。Jones等は200kbarの圧力に対して0.69 Åの核間距離を得た。この値は常温1気圧での重水素分子内の核間距離に比べて短くなっているため核融合反応率を増加させる効果があるが、報告されている常温核融合実験のデータを説明することはできない。

クーロン場の遮蔽について別の角度から見ることで高密度核融合 (Pycnonuclear fusion) の考え方に至る。D核と電子からなる2成分系のプラズマの密度を上げて行くと、電子の遮蔽効果 (デバイ遮蔽) でクーロン障壁が下がるが、更に密度を上昇することで核はクーロン格子を組むようになる。この条件下で起こる核融合をピクノ核融合と呼び、Salpeter等が反応の表式を与えた⁹⁰⁾。この核融合は電子密度から決まるWigner-Seitz球の半径 r_s の格子間隔を持つ系の核融合によって良く近似できること

が鹿園により示されており⁹¹⁾、前述の重水素凝縮系のクーロン遮蔽による反応率増加と同様の結果を与える。また、前述のRafelskiの解析結果⁷⁹⁾とも矛盾しない。即ち、クーロン場の遮蔽の強化というメカニズムによるならば、核間距離を一定値まで下げ得る環境を作らない限り実験結果が説明できない。一丸は、超新星爆発の理論に基づいて、適当な条件下の超高压液体金属においては、ピクノ核融合の反応率が増強されて有意の核融合反応が観測されることを示唆し実験を提唱しているが、必要な圧力が非常に高く現在の「常温核融合現象」がこの理論で説明可能であるとしているわけではない¹⁷³⁾。

(3) 重い負電荷粒子による遮蔽

実在する重い負電荷の粒子の関与によって「常温核融合現象」が起こるという考え方の一つとして、宇宙線中のミュオンによるミュオン触媒核融合が実験で観測されているのではないかと推定がGuinan等⁹²⁾によってなされた。ミュオン触媒DT核融合を例にとると、 μ DT分子の生成や核融合反応の過程はミュオン分子の寿命(2.2 μ sec)に比べて十分速いのであるが、反応後にミュオンが生成物であるヘリウムに吸着されて触媒として働かなくなる確率(付着率)が少なくとも0.5%程度あるために、「実用化を考える時には、『高価な』ミュオンが約170回しか核融合反応に寄与できない」という問題がある。

ところで、常温のDD核融合の説明として宇宙線によるミュオン触媒核融合を考える際には3つの大きな問題がある。まず第1に、負のミュオンが原子核に放射捕獲される確率は原子核の電荷Zの4乗に比例して大きくなるのでPdやTiに入射した宇宙線ミュオンは直ちに原子核に捕獲されて触媒反応には寄与し得ないと考えられる。第2の問題は、 μ DT分子の生成とは異なり、通常 μ DD分子生成過程はミュオンの寿命に比較して遅いということである。第3に生成物のヘリウムへのミュオンの付着率も決して小さな値ではない。これに対し、Guinan等は水素同位体を十分に吸蔵した金属中の電子による遮蔽、 $\mu^3\text{He}$ と μD の共鳴的荷電交換や μDD の結合エネルギーは金属中で容易に吸収され分子が生成されやすい等の理由を上げて、上の問題点は解決されたとし、常温核融合実験の条件のもとでミュオン1個は約700回もの核融合を起こし得るものと推定した。しかし、永嶺等は、この可能性に疑問を抱き、重水素や重水を含むPdターゲットに加速器で作られたミュオン・ビームを照射して中性子及び $\mu^3\text{He}$ からのX線を観測してこの仮説の可否を確認する実験を行なったが結果は全く否定的なものであったので⁹³⁾、現在では、「常温核融合」が「金属結晶中で起こったミュオン触媒核融合」であるという可能性はないものと考えられている。

ミュオン以外の未確認の重い負電荷の粒子が実際に存在するとして常温核融合現象を説明する試みもいくつかなされている⁹⁴⁻⁹⁷⁾。重い負電荷の粒子による触媒核融合というアイデアは魅力的なので以前から議論がなされている¹⁷⁴⁻¹⁷⁶⁾。Shaw等⁹⁵⁾は2個の反クォークの結合したものが安定に存在するとして、また、Rafelski等⁹⁴⁾は未知の超重粒子Xの存在を仮定して議論を進めている。ミュオンに比べてはるかに重い粒

子を考えることで触媒粒子が他の原子核に捕捉されて失われる可能性が小さくなるが、そもそもそのような粒子が実験的に観測されていないのでこれらは今の所現実的な理論であるとは言い難い。

(4) 透過共鳴モデル

単一の厚く高いポテンシャル障壁によってほとんど反射されてしまう粒子の流れも、量子力学的取扱のもとでは複数個のポテンシャル障壁を組み合わせるとある離散的エネルギーについては、共鳴的にほとんど完全に透過することがある。この現象が常温核融合に関わりあるのではないかという指摘がTurnerによってなされた^{98,99)}

(透過共鳴モデル：TRM(Transmission Resonance Model))。これは、間隔を適切に選んだ複数のポテンシャル障壁のある系について1次元のシュレディンガー方程式を解くことで示すことができる。現実的な3次元の系で同じことが成り立つものならばこのメカニズムのもとに常温で核融合反応は起こりそうであるが、これだけでは実験的に観測されている過剰熱は説明することはできない。そこで、Bushは通常の核融合反応に加えて種々の核反応が起こるとしてこのモデルに基づく常温核融合のシナリオを組み立てた^{100,101)}。後に、最初のBushのTRMでは十分な反応率が得られないことがJandelによって示され¹⁰²⁾、改良が加えられたとあるが、現実の実験との対応は明確でない。また、軽水を使った実験で「常温核融合現象」が観測される場合があることの説明として、マジックナンバー近傍の原子核の核融合が起こる可能性を指摘している。全体に定性的評価と推測に基づいた議論なのでその正当性は判定し難い。透過共鳴モデルは、常温核融合の中心課題であるクーロン障壁の遮蔽現象に関連してきわめて興味深いモデルであるため多くの著者によって取り上げられ検討が加えられているが¹⁰³⁻¹⁰⁵⁾、実際の3次元の配位でどのようなモデルが考えられるかについては明らかでない。現在のところ、1次元のシュレディンガー方程式を解いて得られた結果を定性的に3次元に適用しただけで、現実的な系について核融合反応率が実際大きくなるのかについて定量的に評価した例はないものと思われる。また、上に述べたように、透過共鳴モデルだけでは過剰熱の発生や生成物の割合等「常温核融合現象」の特徴的な性質を説明することができない。

(5) 結晶中のコヒーレント核融合理論

Hagelsteinは、トリチウムと熱の発生量に比べて中性子発生量が無視できるような常温核融合の可能性としてコヒーレント核融合理論^{106,107)}を提唱した。まず、高エネルギー・ガンマ線を放出して進行する反応は、多数の低エネルギー光子を放出することによっても進行するという前提にたってコヒーレント2段階核融合／ベータ崩壊過程を解析したが、このような過程を考える限りクーロン障壁を克服することは困難で大きな核融合反応率を得ることはできなかった。そこで、次にHagelsteinは、この過程の前後を逆にした2段階ベータ崩壊／核融合過程を考えた。この反応が進行するに際しては、ベータ崩壊の結果の仮想中性子が陽子に捕獲されて重水素がで

きるのでクーロン障壁の問題はない。この過程に関して生ずる問題点は、

- ① 弱い相互作用によるベータ崩壊が十分な速さで起こり得るのか？
- ② 仮想中性子の飛程は 10^{-12} cm程度の小さなものと考えられるのでこの中性子が陽子に捕獲されることは実際にあり得るのか？
- ③ 核エネルギーはどのように放出されるのか？

等である。Hagelsteinによれば、これらの問題は、ベータ崩壊がコヒーレントな超放射(Superradiance)過程¹⁰⁸⁾としておこるとともに核エネルギーと電流の結合が集团的に進行すれば解決するとしている。この種の過程は上に記したものの以外にも色々考えられる。しかし、定量的評価の結果は発表されていない。Hagelsteinはその後、過剰熱の発生する反応は、核エネルギー・レベル($\sim$ MeV)と格子のエネルギー・レベル($\sim$ meV)のミスマッチを克服して発生するエネルギーを熱化する過程としてメスバウア効果と同様のものとして捉えて解析を進めた¹⁰⁹⁻¹¹²⁾。また、Chatterjeeは、常温核融合は純粹の核融合反応ではなくて、弱い相互作用を含む反応であるとする考えを提案した¹¹³⁾。その意味でHagelstein理論と同じであるが、仮想中性子は考えない。左辺に電子を含む3体反応で、電子の多いところで起こるとしている。

一方、Schwingerは、異なった観点から結晶格子内コヒーレント核融合について論じている¹¹⁴⁾。この理論によれば、常温DD核融合は中間状態として ${}^4\text{He}$ の第一励起状態を経由して起こることが重要である。 $n+{}^3\text{He}$ 生成の閾値が ${}^4\text{He}$ の第一励起状態の上にあるのでこの分岐は抑制されてp+T分岐だけが実現される。ところが、最初の重水素2個の状態も ${}^4\text{He}$ の第1励起状態とともに正のパリティであるために、パリティ変化の必要な静電ダイポール放射を伴う遷移は禁止される。しかし、結晶格子との間で多数のフォノンを交換するコヒーレント過程を考えることでこの遷移は実現し、p+T分岐の反応が観測される。この過程を記述する重要なパラメータは、重水素の零点振動の平均振幅 Λ 、周波数 ω 、平行状態の重水素核間距離 R_0 などである。X線測定の結果得られた $\Lambda \approx 0.1 \text{ \AA}$ 及び $2\pi\omega \approx 10^{15} \text{ \AA}$ を使い、Sun and Tomanek¹¹⁵⁾の結果の $R_0 > 0.94 \text{ \AA}$ を用いて大胆な近似のもとに議論を展開している。この結果、トリチウム発生率として 10^3 s^{-1} が得られた。さらに、 Λ を25%増して $\Lambda = 0.125$ とすると、トリチウム発生率は 10^{10} s^{-1} に増大する。実験値はこれらの数値の範囲内に入る。著者は、結果がパラメータのわずかな変化に極めて敏感である点が特に重要であると指摘している。

(6) 重水素の多体核融合反応

高橋による多体核融合反応理論^{116,117)}は、2体衝突過程で問題になるクーロン障壁の透過率の増大については何らかの未知の効果を仮定した上で、このような状況が実現するものならば反応は2体衝突に留まらず多体衝突が起こって中性子発生が少ない現象が実現することを主張している。

まず、高橋はクーロン障壁透過率の増大を実効電荷の減少によって説明する。何らかの理由で電子雲が都合よく配置され、原子核の実効電荷が $1/35$ 程度にまで減少すれば、核融合反応率は 10^{-13} s^{-1} となってJones等の実験における反応率のレベルは達成

できる。このような状況のもとで、DD 2 体衝突の結果中間状態の ${}^4\text{He}^*$ が生成される。Pd凝縮系の中で、このような ${}^4\text{He}^*$ の寿命の間最初の電子雲が存在し続けると考えられ、近傍に振動している D^+ が存在すると ${}^4\text{He}^*$ とDの反応が高い確率で起こり、結局、DDDの3体反応が起こり、中性子が発生しない常温核融合が実現する。多体核融合反応の可能性に関連して加速器を用いた検証実験がなされ3体反応が実際に起こっている可能性が報告された。この問題についての検討は第4章(4.3節)においてなされている。

(7) その他のメカニズム

Das & Rayは、Pd格子中で酸素との相互作用で電子バンド構造が変化して、準分子状態(D^+D^+) $2e^-$ ができ、これによって核融合が促進されることを提案した¹¹⁸⁾。

また、Chubb & Chubbは結晶中にイオンのバンド構造が形成され、核融合が起こること、および選択律によって不要の反応は起きないことを考慮して常温核融合のシナリオを提案した^{119, 121)}。同様の理論はWaberによっても提案された^{122, 123)}。イオンがバンド構造をとって非局在化するので波動関数が重なりあって核融合が起こるというアイデアは、振動スペクトルの解析からCu結晶表面でp(陽子)がバンド構造をとっているという観測結果の報告¹⁷⁷⁾に根拠をおいている。

また、Matsunamiは重水素が十分つまった状態でコヒーレントな流れが起き、電子の多い部分を通るときに遮蔽効果で核融合が起きるという過渡現象過程を推測した¹²⁴⁾。

中性子が複数個結合したダイニュートロンあるいは、ポリニュートロンによって核融合反応が起こるという推測についてはいくつかの論文にある。Yangのシナリオでは、重水素が弱い相互作用で電子を吸収し、ダイニュートロンとなって他の重水素あるいは他の核と反応する¹²⁵⁾。クーロン障壁の問題はなくなるが、アイデアのみで詳しい解析はない。Fisherは、中性子および三重水素発生量を少なくしてかなりのエネルギー発生を見るための工夫としてポリニュートロンを導入した¹²⁶⁾。A(質量数)が6以上のポリニュートロンは安定で成長するとしている¹²⁷⁾。

Jandelは、QEDの閉じ込め相(CQED)という仮説によって常温核融合を説明しようと試みた¹⁷⁸⁾。Jandelによれば、非常に強い過渡的電磁場の中にCQED領域が生じ、その中では e と e^+ 、 e とN(核)が強く結合した状態で存在し、常温核融合に寄与する。この仮説は、重イオン衝突実験での $e-e^+$ スペクトルを説明するために導入されたもの¹⁷⁹⁾に基づくものであるが、その仮説自身基本原理から理論的に導くには至っていない。常温核融合の場合、このCQED領域は、結晶中に含まれる核分裂物質の自発核分裂がひきがねになってタネができて成長するものとしている。同様に、Mayer & Reitzは共鳴粒子 ep, ed, et の存在を仮定して常温核融合の説明を試みている¹⁸⁰⁾。

Cerofolini等の理論では、高密度衝突性カスケード中で二核原子(H^+H^+) $2e^-$ ができるとしている¹²⁸⁾。この二核原子の生成のための活性化エネルギーは $\sim 30\text{eV}$ 、解離の活性化エネルギーは数 eV である。

3.3 微小領域高温核融合 (マイクロホットフュージョン)

結晶中にクラック(裂け目)が発生すると、そのクラックの両面に電荷が残り強い電場ができることがある。このような局所的な電場によって重水素核が加速されて核融合反応が起こり、常温核融合現象として観測されるのではないかという推測がなされた¹²⁹⁾。竹田と滝塚はこの現象をフラクトフュージョン(Fracto-fusion)と名付けて半定量的な解析を行なった¹³⁰⁾。この解析は、クラックの所に発生する電位差の大きさを仮定して、重水素核に対する結晶の阻止能と核融合反応断面積から実効的な核融合反応率を求めるものである。結晶内にクラックが充満する時間尺度を1月程度とし結晶中に吸蔵されている重水素核の1/1000程度が反応に関与するとすれば、クラック電位差10-30keVに対して重水素核一個当たりの実効的な核融合反応率は $1 \times 10^{23} - 6 \times 10^{20} \text{ s}^{-1}$ 程度と期待され、Jonesなどの中性子測定値と矛盾しない。

フラクトフュージョンモデルは常温核融合実験における中性子発生を説明する理論として有力である。実際、電解法によっても乾式法によっても大量の重水素の吸蔵のために材料が脆化してクラックが生じているのは多くの実験で観測されている。現象の再現性の無さやバースト的あるいは間欠的中性子発生もこのモデルの有力な証拠のように見える。特に、常温核融合の発見が報告される前の1986年に、Klyuev等がアルカリハライドの結晶を弾丸で叩いて中性子の発生を観測した¹³¹⁾という報告はこのモデルの妥当性を示唆しているように見える。しかし、以下に示すいくつかの問題が直接的には答えられていない。

- ① クラックの所に本当に高電位差が発生するのか？
- ② 電位差は核融合反応を起こすだけ十分長く持続するのか？
- ③ 実験を説明し得るだけの量の重水素核が実際に加速されるのか？

常温核融合実験において電位差が生じていることの報告¹³²⁾はまだ少ないが、別の目的で行なわれた実験ではしばしば大きな電位差の存在を示唆する現象が得られている。これらの実験では、主としてアルカリハライド等の絶縁物の結晶に人為的なクラックを発生させること等で数10keVから数MeVに及ぶ高いエネルギーの荷電粒子やX線等の放出が観測されている¹³³⁻¹³⁵⁾。また、荷電分離が単なる統計的ふらつきでなく何らかの原因でクラック両面に広範囲且つ系統的に発生したものならば、クラック伝播速度が十分速い場合(10^3 m 程度以上)、PdやTiのような金属結晶においてさえ電荷が中和されずに長い時間(10^{-10} s)持続する可能性があることが理論的に示された¹³⁶⁾。フラクトフュージョンモデルは多くの著者によって検討された。Yasuiは、導体中のクラックについて生成条件、電場の大きさなどについて調べて実験が説明できるとした^{137, 138)}。Zhangは、常温核融合実験における相変化に応じて高圧の泡ができ、これにより生じたクラックによって荷電分離が起こってフラクトフュージョンに至るというシナリオを提唱した¹³⁹⁾。また、TsarevによってMHFの研究がサーベイされている⁷⁾。Kuehnelは、重水素の泡の表面の電荷の中性化率を求めた(~ 0.1)¹⁴⁰⁾。これによれば、泡の上の電子に働く引力が化学結合の力($\sim 10^8 \text{ eV/cm}$)になるまで電荷は中和される。また、クラックができると音が放出され重水素が放出される。熱対中性子

の比は加速重水素のエネルギー損失で説明できると結論づけている。衝突による重水素のエネルギー損失で小さな高温領域ができる。ここで核融合が起こる。その結果、爆発が起こる。これによってさらにクラックができる。このようにしてバーストが発生する。このシナリオでは3重水素の量が多いことは説明できない。

超音波によって液体中に高温・高密度のホットスポットができる（ソノルミネセンス¹⁸²⁾）。このような状況で核融合が可能である。これをソノフュージョンと呼び、Fukushima等により検討された^{141, 142)}。実験的には、液体に超音波を入射することで蒸気あるいはガスの充満したキャビティができて温度約0.5eVのホットスポットとして観測されている。Fukushima等は、1barの液体に振幅4bar周波数15kHzの超音波をかけた場合の最大温度、キャビティあたりの核融合反応数を理論的に評価した。平衡半径1mmのキャビティについて最大温度10keV以上、1秒あたりキャビティあたり核融合反応数 10^{10} 以上という値を得ている。

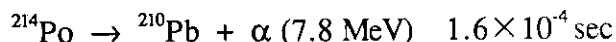
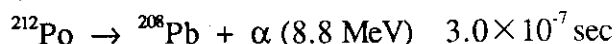
なお、クラックにおける電場による直接的な加速ではなく、クラックの所にできた高温プラズマ¹⁴³⁾あるいは重水素核が重水素分子になるとき開放される20eVのエネルギーによる高温プラズマ¹⁸⁰⁾中での核融合の可能性も指摘されたが、詳しい検討はされていない。

3.4 核融合反応以外の核反応

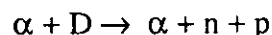
「常温核融合現象」における核反応生成物の起源を核融合反応以外の核反応に求めようという試みは、特に常温核融合研究の初期にいくつかなされている。

「常温核融合現象」の一つとして観測される中性子は宇宙線起源のものではないかという指摘が当初からなされている¹⁸³⁾。常温核融合実験における中性子計測については多くの熱心な議論がなされ、計測結果についても信頼性が増して来ている。これらは、特に実験データの解析に際して詳しく議論されている。しかし、今までに観測された中性子についてその起源が完全に明確になったとは言えない。

核融合反応以外の核反応によって中性子発生の説明をする試みの一つとして、環境中のアルファ粒子によって重水素核が分解して中性子を放出する可能性がCribier等¹⁴⁵⁾によって指摘された。環境中には、 ^{233}Th チェイン及び ^{238}U チェインの ^{212}Po と ^{214}Po がわずかに存在し、それぞれが次のような反応で約8MeVのアルファ粒子を放出する。



このアルファ粒子が重水素核と衝突すると核はpとnに分解しJones等の実験で見られるように中性子が観測される。



この反応の断面積については余りデータが存在しないが、いくつかの文献^{146, 148)}に基づきCribier等は8MeVで0.1barnを仮定して議論を進めている。Jones等の実験値を説明するには重水中に25000 Bqのアルファ放出核の存在が必要とされる。この数値は極めて大きい。貴金属の中には1g当たり1000 Bq以上の放射性物質を含む場合がまれ

ではないことからここに示した可能性が必ずしも否定できないことを主張している。

これに対して、Liは試料中の核分裂物質による「常温核融合現象」の検討を行った¹⁴⁹⁾。核分裂を原因とした時の問題点は、5-20MeVにもなる活性化エネルギーはどうするかということ核放射の処理であるが、これらは、二重ポテンシャルによる3次元共鳴トンネリングで解決したとある。しかし全体に定性的議論の域を出ていない。

3.5 化学反応および固体物性反応

基底状態より下に原子のエネルギーレベルが存在し、「常温核融合現象」はそのレベルへの遷移に際してエネルギーが放出されるものであるとの推測がいくつかなされている¹⁵⁰⁻¹⁵²⁾。Mills等は、基底状態の下に-27.21 eVのレベルがあるとし、 K^+ と K^+ 及び Pd^{2+} と Li^+ の電気化学的反応を通じて電子が基底状態より下のエネルギーレベルまで落ちるとした^{151, 152)}。また、Maly & Vavraは、水素原子の相対論的シュレディンガー方程式を解くと約500keV下に今まで無視されていたレベルが存在することを示し¹⁵³⁾、これに対して、Rice等は、Maly & Vavra理論は計算間違い^{184, 185)}であること、Mills理論が正しいならばなぜ今までスペクトル線が見い出されていないか?という疑問、また、強く結合した分子があるならそれは準安定でなく不安定であることを主張している¹⁵⁵⁾。

「常温核融合現象」は通常の化学反応として説明できるので、未知の「常温核融合」反応をわざわざ持ち出す必要はないという主張はこの研究の初期のころから多くの論文に述べられている^{186, 187)}。

一方、過剰熱はPdへDが溶解する時の溶解熱である等、現在の「常温核融合現象」は既知の理論の範囲内で説明がつくとする主張も数多くある⁴¹⁾。この問題については次章で詳しく検討される。また、このような固体物性に関連して、AbuTahaは、クラック発生時の熱の発生に着目し、金属の脆化と「常温核融合現象」の関係を論じ、過剰熱はクラック発生に基づくものとしている^{188, 189)}。

3.6 討論

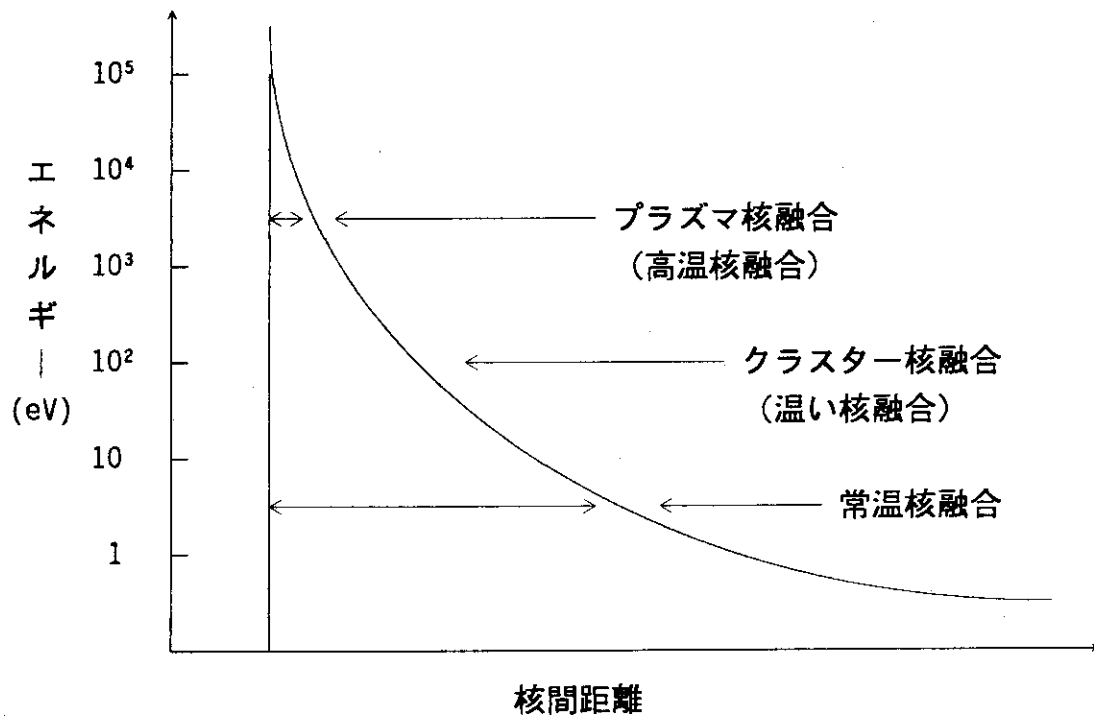
常温核融合が現実のものであるとすれば、どのようなメカニズムによるのかと言う理論的研究は、常温核融合実験の最初の報告以来1年半程の間に多数発表された。上に述べたように、5年を経過した今日これらの理論と基本的に異なる新しい考え方は出ていないとは思えない。また、常温核融合の存在に肯定的な理論については十分説得的なレベルにまで掘り下げられたとは思えない。現在「常温核融合現象」は観測されるがこれは「常温核融合」以外の現象として説明できそうだという説が説得力があるように思えるが、まだ最終的な結論は出ていない。ここでは、あえて、個々の理論の信頼性は評価せずに広い範囲の理論モデルをサーベイした。当初発表された理論的論文の中には、2体衝突に際してのクーロン障壁の遮蔽に関するものが多く、常温核融合に対して肯定的なものから否定的なものまで広く分布している。

しかしこのような立場で常温核融合の存在を肯定的に議論したものの中には十分説得力のあるものは少なく、むしろ厳密な論理展開によってこのような過程の存在を否定した論文が目立つ。例えば、Leggett and Baym¹⁵⁶⁾は、2体衝突の場合についてBorn-Oppenheimer近似を使った計算でDD、pD、DT核融合反応率の厳密な上限値として、それぞれ、 $3 \times 10^{-47} \text{ s}^{-1}$ 、 10^{-41} s^{-1} 、 10^{-50} s^{-1} を得ている。この結果に基づき多体系の場合には非現実的な相関を考えない限り実験を説明し得るほど大きな核融合反応率は得られないとしている。一方、この問題は、Pd固体中で重水素核の核間距離がどれほど短くなれるかと言う観点からも議論できる。この点については、Sun and Tomanek¹¹⁵⁾及び深井¹⁵⁷⁾によって否定的な結果を与えられている。前者は、仮想的物質PdH₂を考えて系のエネルギー的考察からHの核間距離が0.94 Å以上になることを示している。これは、気体の重水素分子の核間距離0.74 Åに比べても大きな値である。また、深井はPdH及びTiH₂の中でのHの核間距離は2.85 Å及び2.22 Åであること、また経験的に金属中の水素原子の核間距離は2.1 Å以上であることから、常温の金属中で水素原子が十分に近づいて核融合が起こることに疑問を呈している。

集団的現象あるいは多体衝突を考慮したものであるがいずれも今のところ完結した理論になっていないように考えられる。しかし、いくつかの実験で報告されているように中性子発生量に比べて大きなトリチウム発生量が観測されている実験が事実であるならば多体反応も含めて核反応そのものを常温核融合の原因とする再検討が必要になる。

マイクロホットフュージョンによる核反応は、このままでは発熱やトリチウム発生を説明することはできない。しかし、少なくとも一部の実験についてはこの理論を確実に否定する実験データは存在しない。擬似的な常温核融合の他の例としては、Anghaie等による核融合核分裂連鎖反応等がある。これは、いくつかの電解方式による常温核融合実験でカソード面においてDおよびLiが濃縮して存在することに着目し、重水素とトリチウムの関与する核融合核分裂連鎖反応の可能性について検討した¹⁵⁸⁾ものである。この理論によれば、まず何らかの原因で生じた核融合反応生成物である高エネルギーのn、p、T、³Heと、カソード表面に存在するD、⁶Li、⁷Li等との間で核反応が起こるが、反応生成物の高エネルギー粒子が連鎖的に生成されて閉じた反応サイクルを構成する。しかし、Anghaieは、定量的計算の結果はあらゆる可能なサイクルについてそれが持続する臨界条件は達成されないことを主張している。

一方、「常温核融合現象」は本当に現実から大きくかけはなれているのだろうかという観点に立ち、反応率が粒子の速度分布に強く依存することをRice等は指摘した¹⁹⁰⁾。例えば、10Vの電解法を考えて反応粒子が10eVの単一エネルギーを持つ場合と温度10eVのマックスウェル分布を持つ場合を比較すると反応率は後者のほうが数十桁も大きくなり中性子生成に関しては実験を説明することができる。これは、クラスター核融合の最初の実験報告¹⁵⁹⁾について提案された解釈¹⁹¹⁾と同様の考え方であるが電解法による常温核融合の説明としては困難であると思われる。



第3.1図 D-Dのクーロン障壁

D原子核同士はプラスの電荷を持っているため、クーロン反発力によって反発しあう。この反発力を越えて2個のDが近づき融合するためには、そのクーロン障壁を乗り越えなくてはならない。D原子核の場合その障壁の高さは $\sim 3 \times 10^5$ eV (30億度の温度に相当) にも達する。

4. 異常発熱を主現象とする 「常温核融合」

4.1 電解法による異常発熱（過剰熱）の検証

(1) 重水電解法と過剰熱の計測法

FleischmannとPons (F&P)の発表以来、重水電解法による過剰発熱の確認実験が継続されている。過剰発熱を確認した研究者の多くも、その再現性に関しては不十分であり、達成できる条件及び因子の解明に取り組んでいる。

先ず、どのような電解セルを用いて過剰熱の測定実験を行っているかを、第4.1表及び第4.1図-第4.4図にまとめて示す。電解セルは、F&Pに代表される開放型(F/P方式)と、最近では標準的になってきた密閉型に大別される。Stormsのレビューによると、1990年頃までの熱測定では殆どの研究者はF/P方式に類似した開放型セルを用いて確認実験を行っていた⁴²⁾。その後、熱測定精度の向上を計ると共に、重水素-パラジウム比(D/Pd)のin-situ測定が容易に行える密閉型セルへと移っている。ここでは、両電解セルの特徴及び過剰熱測定法を中心に紹介する。

(a) 開放型セル

開放型セルでは、電解時に発生する重水素(D_2)、酸素(O_2)ガスをセルの外へ放出しており、電解液量が減少するために、時々電解液を補充する必要がある。更に、ガス放出に伴う重水(D_2O)の放散と電解液の蒸発、酸素と水素の再結合、電解質(Li^+)の濃縮等による液抵抗変化によるセル電圧の変動、液面の変化による熱移動に関するセル定数の変動等が起こる。このために実験は容易であるが、パラメータが多く過剰熱発生量の計算が複雑となる。

当初、F&Pの熱測定に関する実験条件とその解析法が不明瞭であったこともあり、早くも1989年にBaleiとDivisekが熱力学データに基づいた理論と実験の両面から検討し、過剰熱の発生を否定している^{43,44)}。その後、WilsonらがF&Pの解析法は過剰熱を過大評価していることを指摘し⁴⁵⁾、それに対し、F&Pが反論している⁴⁶⁾。いずれにしても開放型セルを用いた実験では、過剰熱発生量の測定評価を高精度で行うのは困難である。

第4.1図にF&Pが最近使用しているデュワー型の電解セルを示す。セル上部は銀コーティング（銀鏡と呼ばれるもの）しており、熱移動は銀コーティングしていない下部の部分で輻射によって起こる。従って、恒温槽への熱移動係数は電解液レベルの変動に殆ど依存しないと述べている^{34,47)}。第4.2図に高橋らの使用している電解セルを示す。熱測定は、外部から20℃の冷却水を5 l/minで循環し、入口温度 T_{in} と出口温度 T_{out} を測定し、後述するフローカロリメトリーと同じ方法で(4.7)式を用いている⁴⁸⁾。

(b) 密閉型セル

密閉型セルは、Stanford Research Institute (SRI)のMckubreらが使用している重水電気分解方式(第4.3図)と⁴⁹⁾、IMRA JAPAN (I/J)で開発した国松らの燃料電池用のアノードであるガス拡散電極を用いた新しいI/J方式(第4.4図)^{52,53)}に大別される。殆どの研究者は前者の方式を採用している。

重水電解方式では、電解時に発生した D_2 、 O_2 ガスをセル内で再結合反応させて D_2O に戻すための触媒を内蔵しており、長時間の電解においても電解液の減少量は殆ど無視できる。従って、過剰熱発生量の計算において、開放型セルで指摘されたような問題点の多くは考慮する必要がなくなり、測定に対する信頼性が高まる。また、残った酸素ガスの分圧は直接Pd中に吸蔵された D_2 ガス量に対応することから、D/Pdの測定ができる。即ち、過剰になった酸素ガス量を測定すれば、その2倍のモル数の D_2 がPd中に吸蔵された量になる。最近、MckubreやStormsらは予め D_2 ガスをセル内に 1 kg/cm^2 程度充填加圧しておき、 D_2 の圧力減少量からD/Pdを測定している^{49,51)}。

一方、I/J方式では、セル内に一定圧($5\text{--}10 \text{ kg/cm}^2$)の D_2 ガスを充填し、アノードで O_2 ガスを発生させない電解法を開発し、電解反応はカソードに重水素ガスを吸収させるだけの役目を果たしている。従って、 D_2 ガス圧力の変化を測定すればD/Pdがin-situで計測できる。

(c) 熱計測法

水の電気分解において、電解入力 W_{in} の一部は水の分解 W_{D2O} に使われ、残りはジュール熱 W_j として消費される。従って、電解による発熱量 W_j は次式で表される:

$$W_j = W_{in} - W_{D2O} \quad (4.1)$$

また、電解入力 $W_{in}(W)$ は電解電流 I (A)と電解セル電圧 $E_{cell}(V)$ の積で表される:

$$W_{in} = I \cdot E_{cell} \quad (4.2)$$

水の分解反応の標準エンタルピー変化 $-\Delta H^0$ は、 D_2O で 294.6 kJ/mol 、 H_2O で 286 kJ/mol であるから⁹⁾、 $E_m = -\Delta H^0/2F$ はそれぞれ 1.53 V 、 1.46 V となる。ここで、 $F=96485 \text{ C/mol}$ である。また、重水の分解に必要なエネルギーは $W_{D2O} = (-\Delta H^0/2F)I = E_m I$ である。従って、ジュール熱 W_j は次式で表される:

$$W_j = (E_{cell} - 1.53)I \quad (D_2O) \quad (4.3)$$

$$= (E_{cell} - 1.46)I \quad (H_2O) \quad (4.3)'$$

もし、反応系が入力熱に対しジュール熱以外の過剰の熱(過剰熱 Q_f)を発生したとすると、出力熱 W_{out} は、 $W_{out} = W_j + Q_f$ で与えられる。従って、 Q_f は次式で表される:

$$Q_f = W_{out} - W_j \quad (4.4)$$

開放型の電解セルを用いた場合のジュール熱 W_j は(4.3)式となるが、密閉型セルでは $W_{D2O}=0$ となるから、 $W_{in} = W_j$ であり、ジュール熱 W_j は(4.2)式で与えられる。

F&Pらの開放型では、電解セル内と一定温度の外部との熱移動係数 k の決定が重要となる。即ち、セルから外部への熱ロスの速度をどう決定するかによって過剰熱発

生量は大きく変わってくる。セル内での熱収支を示す基本式は次式で表される^{45,47,58)}：

$$C \cdot M \cdot dT/dt = W_j + Q_f - k_R \cdot (T^4 - T_0^4) - k_C \cdot (T - T_0) - L \cdot dM/dt \quad (4.5)$$

ここで、 C 、 M 、 L はそれぞれ重水の比熱、電解液の重量、重水の蒸発熱を表す。 k_R は輻射による、 k_C は熱伝導による熱移動係数である。また、重水の蒸発量が少ない場合には右辺の最後の項は無視できる。 $F&P$ は過剰熱を算出する場合、初期の頃は $k_R=0$ で、その後は電解セルの改良により $k_C=0$ としており、 $k_R=7 \times 10^{-10} (W/K^4)$ 程度の値を用いている。測定精度を示す k_R の標準偏差値は0.17-1.4%であると述べている⁴⁷⁾。

Mckubreらの触媒内蔵の密閉型セルでの熱計測法はフローカロリメトリーである。この方式は第4.5図に示すように、電解時にセル内で発生する全熱量を一定温度の冷却水を通し、冷却水の入口温度 T_{in} と出口温度 T_{out} の差から、次式を用いて熱発生量 W_{out} を求める方法である。

$$W_{out} = F_{H_2O} C_{p,H_2O} (T_{out} - T_{in}) \quad (4.6)$$

ここで、 F_{H_2O} は水の流量、 C_{p,H_2O} は水の比熱である。フローカロリメトリーの精度は流量及び温度計測の精度に大きく支配される。Mckubreらは、過剰熱 Q_f を次式を用いて計算している⁴⁹⁾。

$$Q_f = (F_{H_2O} C_{p,H_2O} + k') (T_{out} - T_{in}) - I E_{cell} - P_h \quad (4.7)$$

ここで、 P_h はヒータ入力、 k' は熱損失を表わす係数である。過剰熱の測定精度はこの k' 値によって左右される。実験結果から過剰熱測定値は95%の確率($\pm 2\sigma$)で有意であると述べている。また、本実験では $k'=0.46 \pm 0.05 W/K$ を用いている。

国松らの燃料電池型セルは、いわゆる等温壁型の断熱型セルであり、Pdカソード中の温度変化の関係をPdとNiカソードで比較し、その差から過剰熱が算出される。カソードをNiからPdに付け換える必要があり、その際の再現性等を考慮すると熱測定誤差は最大で入力の $\pm 5\%$ 程度と報告されている⁵⁸⁾。

小山らは双子型カロリメーターを用いて熱測定を行っている。この方式は、一つの恒温槽内に同一条件の伝導熱量計2個を配置し、二つのセル間の温度差を測定するものであり、測定精度は入力の0.1%程度と高いが、入力電力を大きくできないという制限がある⁵⁴⁾。

(2) 重水電解法による過剰熱発生条件の検討

第4.2表に代表的な重水電解法による過剰熱測定条件と過剰熱発生量をまとめて示す。最近では、再現性をもって過剰熱発生を得るための条件がかなり明確になってきたといわれる。第一は $D/Pd > 0.85$ 、第二は $i > 100-200 \text{ mA/cm}^2$ 、第三はPd材料の結晶構造等の物性が挙げられている。更に、 $D/Pd > 0.85$ は必要条件であって、過剰熱を発生するためにはカソード内で何らかの非定常状態が必要であるとの結果或いは指針が得られつつある。

過剰熱測定法は、前述したように密閉型のフローカロリメトリーが標準的になっており、開放型のF/P方式は少ない。これは、熱測定精度の向上とD/Pdのin-situ測定

が同時に達成できることによる。また、カソードのPd内への重水素の高充填のみならず、何らかの非定常状態を作るため電解電流の印加方式(高橋、小山)の検討がなされている。

阪大の高橋方式は、カソードの大きさに対し電解液量が非常に多いのが特徴である。これはL、Hのパルス電解法を採用し、5Aと比較的大きな電流を流すことによるものと考えられるが、熱測定精度の観点からは問題があると推測される。しかし、高橋によれば測定精度は予想よりも高く、 ± 0.4 W程度の精度があると述べている(高橋は密閉式セルも核反応生成物の確認試験では使用している)。

小山はより精度の高い双子型カロリメトリを採用しており、カソード内に何らかの非定常状態を作るため電解電流として直流(DC)に交流(AC)を加えた方式で研究を進めており、今後の測定結果が注目される。また、小山、太田らは一定電流ではなく、電解入力を一定($IV_{\text{cell}} = \text{一定}$)にした電解法を採用している^{54,55)}。

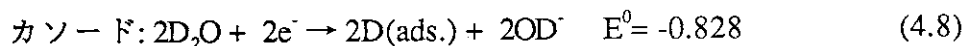
以下、IMRA JAPANの研究を中心に、F&P及びSRIのMckubreらの研究を紹介する。他にも多くの研究報告があるが、ここでは触れない(第2章及び第4.2表を参照)。

(a) IMRA JAPANの研究^{6, 15, 28, 52, 53)}

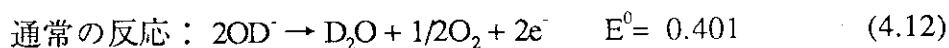
国松らは、重水を用いた電解法であるが、従来の電解法とは異なる新しい方法を開発し、精力的に過剰熱発生要因の探索を進めている。ここでは、新型セルの電解反応機構と主な研究成果を記す。

①D₂加圧式の新型電解セルの開発

電解セルは第4.4図に示す。本セルの特徴は、カソードにはPdを使用しているが、アノードに燃料電池用のガス拡散型電極を使用し、従来の水電解による酸素発生の代わりにD₂ガスの電解酸化によりD⁺を生成する方法にある。このために、セル内には電解液と同時にD₂ガスを充填(5-10 kg/cm²)する必要がある。アルカリ水溶液中の電極反応は次のように表される。ここで、(4.10)式を除いた標準電極電位E⁰(V)はH₂Oの値である。



ここで、2D(ads.)はPd表面に吸着しているD、2D(Pd)はPd中に吸収されたDである。以上から、電解反応によってD₂ガスがPdに吸収されるのみで酸素を発生しないことがわかる。しかし、電解電圧を高くすると(4.12)式で表される酸素発生のある通常のアノード反応も起こるため、ガス拡散電極の使用条件等の検討、例えば、アノード電極の一部はD₂ガス相に出したり、カーボン紙-ポリテトラフルオロエチレン(PTFE)膜フィルタをガス拡散層に付加してガス供給が容易に達成できるように工夫している。



②D/Pdの測定法

D₂ガス圧力は、Pdカソードに吸収されるため、電解の進行と共に減少する:

$$(P_0 - P)V = (n_0 - n)RT \quad (4.13)$$

P_0, n_0 : 電解前の D₂ ガス圧力及びモル数

P, n : 一定時間電解後の D₂ ガス圧力及びモル数

V : 電解前に測定した容器のフリーの体積

D/Pdは圧力減少から、(4.13)式を用いて次のように求められる。ここで、 n_{Pd} はカソードにおけるPdのグラム原子数を表す:

$$2(P_0 - P)V/RT = 2(n_0 - n) = \text{Dの吸収量 (モル数)} \quad (4.14)$$

$$\text{D/Pd} = 2V(P_0 - P)/RT/n_{\text{Pd}} \quad (4.15)$$

(4.15)式を用いるための補正項として以下の3項目が挙げられているが、誤差は1-2%と小さい。3項目は、電解中の温度変化によるD₂O蒸気圧の変化、電解液中のD₂ガス溶解度の変化、圧力及び温度変化によるPTFE中のD₂ガス溶解度の変化、の各変化である。最近、3項目の影響をより小さくするために、セル内壁をPTFEからセラミックスコーティングしたものに变更している¹⁹³⁾。

③H(D)/Pdの制御因子の検討

Pdカソードへの水素(重水素)吸蔵量を支配する因子として、温度、電流密度、カソード過電圧、電解液組成、カソードの表面修飾及び材料物性等を挙げて、これらの影響を検討し、以下の結果を得ている。

- ・ H(D)/Pdは、Pdカソードの水素過電圧 η に支配され、 η が大きいほど増大する。
- ・ 電解液組成としては、酸溶液よりアルカリ溶液でH(D)/Pdの値は高い。
- ・ H(D)/Pdの電解時間依存性は電流密度 i で制御可能である(0.93 at 500 mA/cm²)。
- ・ 同位体効果: 吸蔵量はD/Pd < H/Pdである。
- ・ D/Pdを高めるための検討結果
 - Li, Na, Kの添加効果: 無添加の場合に最大である
 - チオ尿素の添加効果: D/Pd > 0.9を達成 (Pdからの水素放出を抑制)
 - Auスパッタリング: Auの有無に係わらず水素は透過する
 - Pd-Rh合金系: 10%Rh(ロジウム)でD/(Pd-Rh)=0.97を達成した。
- ・ D/Pdのin-situ計測法を確立(従来はD₂ガス圧力の変化から測定)
 - 電気抵抗測定法: R/R_0 vs D/Pdの実測値はSRIの結果とよく一致した。
 - D/Pdの測定精度は±0.05である。

④過剰熱発生条件の検討

過剰熱が発生するためには、 $\text{D/Pd} \geq \text{ca.} 0.83$ 、 $i \geq 100\text{--}200\text{mA/cm}^2$ を必要とする。また、過剰熱は $i \geq 100\text{mA/cm}^2$ では i に比例して増大する。過剰熱は最大5 W/cm³(電解入力に換算して約50%)を得ている。また、Pd-Rh合金では $\text{D}/(\text{Pd-Rh}) > 0.9$ が容易に達成されるものの過剰熱はPdほど大きくなく(第2.3図及び第2.4図参照)、また過剰熱発生におけるD/Pdと電流密度の役割はPdの場合と異なり、電流密度の方がより重要で

あることを示す結果が得られている（第2.2図参照¹⁹³⁾）。

今後の課題として、重水素吸蔵率に及ぼすカソード材料の金属学的及び結晶学的性質の影響と解明、フローカロリメトリーシステムの開発による熱測定の高精度化及び高出力化、 ^4He 、トリチウムなどと過剰熱の同時計測による過剰熱発生過程の解明、及び過剰熱を支配する要因の解明等を挙げている。

(b) NHE ラボの研究⁶⁾

2.3節で全体の概要を紹介したが、ここでは実験計画について簡単に記す。過剰熱確認実験は、F/P方式とIMRA JAPAN (I/J)方式の2方式を採用している。1994年2月から1サイクル2カ月の期間で実験を開始したが、現在、過剰熱を確認する状態に至っていないようである（1994年7月現在）。電解セルの作動条件は第4.6図に示すように、電解電流 $I=200\text{ mA}$ で48時間1サイクルで約2カ月間継続する方式をとっている。

(c) SRI の研究^{49,60)}

Mckubreらは、D/Pd、過剰熱発生、及び核反応生成物 (n , ^3He , γ 線測定可能、 ^4He は測定不可) の関連性及びそれぞれの主要因子を総合的に検討している。また、我が国で開始した「新水素エネルギー実証技術開発」プロジェクトに関しても緊密な協力関係をもっており、IMRA JAPANの国松らと共に「常温核融合」研究では中心的な存在である。特に、過剰熱発生は $D/Pd>0.85$ に達しないと起こらないと最初に発表し（第2.1図参照）、その後の研究方向を位置付け、D/Pdと過剰熱の相関性及びD/Pdを高めるための先導役を果たした。

過剰熱の測定には、前述したように密閉型のフローカロリメーター（第4.5図）を新たに製作している。この方法を採用することにより熱測定の精度は高まり、測定誤差は1%以下に低減できたとし、過剰熱の証拠は Essential unmistakable であると述べている。また、過剰熱の再現性は第4.3表に示すようにD/Pdに大きく依存し、D/Pd=1では100%であると報告している⁶⁾。

フローカロリメータを採用する前の報告では、過剰熱発生量は最大 15 W/cm^3 で、全発生量は 200 MJ/mol.Pd であった。この値は 2 keV/Pd に相当することから、化学的には説明できないとされていた。今回得られた過剰熱とD/Pdの経時変化の関係を第4.7図に示す。過剰熱発生量は、 $1.2\text{ W}(4.2\text{ W/cm}^3)$ で約300時間継続しているから、 $1.2\text{ MJ}(4.3\text{ MJ/cm}^3)$ となる。この場合でもPd原子1個当たり数百eVに達する。この期間の全入力は約 50 MJ （電解入力 36.3 MJ 、ヒータ入力 12.6 MJ ）である。過剰熱の全入力に対する率は約2.4%である。カロリメータの測定誤差は1%以下であると述べていることを全面的に信じたとしても、このデータの信頼性には疑問を持たざるを得ない。

過剰熱の発生には2つの異なるモード、<1>過剰熱1~50%の低いレベルでは電流密度に比例する、<2>過剰熱350%に達する高いレベルでは電流密度に依存しない、が得られたと述べている。<1>の場合、過剰熱は電流密度100-200 mA/cm²以上のしきい値を越えると直線的に増加すると述べている。

また、D/Pdを高めるためにどのような因子が影響するのかという観点から、クラック、電流均一性、境界皮膜、不純物、再結合抑止触媒等に関する検討を進めた。チオ尿素の添加はカソード表面における水素ガスの発生を抑止し一時的な効果はあるが、長期間の電解中に分解や揮発し、高D/Pdを保持するには効果的でない。長期間高D/Pdを保持するのに、電解溶液に200 ppm程度のAlおよびSiを添加すると効果的であることを見出している。

(d) Fleischmann と Pons の研究^{34,47)}

過剰熱の測定は前述したように第4.1図に示した開放型電解セルを用いている。過剰熱は高温になるほど増大し、1 kW/cm³以上を得たと報告している。カソードへの重水素の充填は、最初の数日間是比较的低電流密度(50℃以下)で行い、その後電流密度を徐々に高くした。本セルは断熱型であり熱ロスが小さいために、電解時間と共にセル内の温度上昇が起こるが充填率は十分維持できるとしている。その結果、過剰熱発生は更に増大し、沸騰に到ると述べている。この現象はビデオを用いて ICCF-3で発表された。彼らはこの結果に着目し、「簡単な新規過剰熱測定法」を提案している。即ち、重水の蒸発量と時間を測定すれば過剰熱は容易に測定できると報告している。以下、測定結果を紹介する。

①重水50 cm³が10分間で沸騰した場合の過剰熱

先ず、カソードの形状は2mm^φ×12.5mmであるから、表面積 $S=0.85 \text{ cm}^2$ 、体積 $v=0.0393 \text{ cm}^3$ 、重量 $w=\rho v=0.472 \text{ g}$ ($\rho=12.02 \text{ g/cm}^3$)、Pdの原子数 $N_{\text{Pd}}=6.02 \times 10^{23} w/M = 2.67 \times 10^{21}$ ($M=106.42$)、Pdのモル数 $n_{\text{Pd}}=w/M=4.4 \times 10^{-3}$ となる。また、1 cm³当たりのPd原子数は $6.02 \times 10^{23} (\rho/M) = 6.8 \times 10^{22}$ となる。

重水の蒸発熱は約41 kJ/mol (100℃) であるから、重水50 cm³ (2.5 mol) では102.5 kJ/molとなる。また、輻射による熱ロスは $k_r[(374.5)^4 - (293.15)^4] \times 600 \text{ s} = 6.7 \text{ kJ}$ である。この間の電解による入力、 $(E_{\text{cell}} - 1.54)I = 22.5 \text{ kJ}$ (セル電圧と時間から推定した値であると述べているだけで、詳細は不明である。この値が測定誤差の大きな原因であると推定される) である。従って、過剰熱 Q_f (kJ) は、 $Q_f = \text{出力}(102.5 + 6.7) - \text{入力}(22.5) = 86.7 \text{ kJ/10min}$ となる。この計算から過剰熱は入力の3.85倍となる。

② 異常な過剰熱の検討

上記の結果から、1分間に約8.7 kJ (8700J/60s=145 W) の過剰熱が発生したことになる。1分間のPdカソード1モル当たりに換算した過剰熱は、 $60 \text{ s} \times 145 \text{ W} / n_{\text{Pd}} = 1.98 \text{ MJ/mol.Pd}$ となる。従って、Pd原子当たりに換算すると、 $1.98 \times 10^6 \cdot (1/1.602 \times 10^{19}) \cdot (6.02 \times 10^{23}) = 20.5 \text{ eV/Pd}$ となる。10分間では205 eV/Pd となる。このエネルギー値は化

学的には説明不可能である。また、Pd 1cm³ 当たりでは145 W/v = 3690 W/cm³となる。更に、カソードからの熱流束は145W/S=170 W/cm²となる。

F&Pが報告している熱流束の大きさがどの程度かを示すために、電気出力100万kW級のBWRにおける最大線出力密度(kW/ft)と燃料集合体の表面積(cm²)^{61,62)}から熱流束を概算した結果を第4.4表に示す。

ここで、電気出力100万kW級のBWRの出力を第4.4表に示した値から逆算してみた。8x8 燃料棒の場合、燃料集合体本数は764本、有効長さを約3.71 mとすると、全体の出力は27.7 (kW/cm)x3.71x10²(cm)x764(本)=7.85x10⁶ kWとなる。電気出力100万kWの場合熱出力は約330万kWであり、この計算値は最大線出力密度から求めたものでは妥当な数値と考えられる。従って、通常の発電時には軽水炉でも数十W/cm²程度となり、F&Pの実験結果が真実であれば、十分に動力炉で実用化を計れるものと考えられる。

(3) 過剰熱データの評価と討論

第4.2表から明らかなように、開放型セルを使用しているF&Pと高橋の場合、過剰熱発生がそれぞれ144.5W、32Wと、密閉型セルを用いた研究者より極めて大きな値を報告している。これは4.1節(1)の(a)開放型セルで指摘した原因によるものと考えられる。その後、密閉型セルを用いて熱測定精度の向上を計ったために、以前に比較して過剰熱の測定値はかなり低下してきたように見受けられる。

ここでは、開放型セルによる熱測定についてBalei とDivisek の指摘を検討してみた。彼らが、F&Pの測定法では過剰熱を過大評価していると指摘した事項は、(4.3)式における $E_m=1.53$ Vにある。第4.5表に示すように、 E_m は温度が上昇するにつれて（特に50℃を越えると急激）に増大する。また、カソードへの重水素の充填率が高くなると電流効率(χ_{D2})が低下し、 E_m も低下することを計算予測している⁴³⁾。

一般に高D/Pdの状態、即ち χ_{D2} の小さい値に達した状態で過剰熱を測定している。この場合、(4.3)式で $(E_{cell} - E_m) > (E_{cell} - 1.53)$ となり、ジュール熱 W_j を過小評価している。従って、(4.4)式で求められる過剰熱 Q は過大評価されることになる。 $\chi_{D2}=0.9$ から0.1に低下した場合、 E_m の変化量 ΔE_m は0.15 V程度であるが、電解電流 I が大きくなると無視できない値になる。

F&Pの場合、 $I=0.5$ A、 $\Delta E_m=0.29$ V (80℃の値、実際は100℃なのでもっと大きな値になる)であるから、 $I \times \Delta E_m=0.145$ Wとなる。過剰熱発生量が145Wと非常に大きな値なので、この場合には無視できる値である。高橋の場合、Hモードで $I=5$ Aと大電流を流しているため $I \times \Delta E_m=0.75$ Wとなるが、過剰熱は平均32 Wでやはり誤差は2.3%とわずかである。いずれにしても、両者の過剰熱の測定値は異常に大きい。最近、高橋らは熱測定精度を高くして実験を行った結果、過剰熱発生が起こらなくなったといわれている。

以上の結果から、Balei と Divisek の指摘は上記の 2 例では問題にならないが、F&P に代表される開放型セルで過剰熱 1W 程度の値を報告したデータは測定精度に難点があり信憑性に欠けるものと判断せざるを得ない。

一方、密閉型セルを用いた熱測定法は比較的精度も高く信頼できると考えられる。現象的には短時間の熱発生ならば観測される可能性が十分にある。例えば、1 W(=J/s)の熱発生を観測した場合、過剰熱発生量は1時間で3.6 kJ、24時間で86.4 kJ であるから、高D/Pd領域における溶解熱変化量から説明できる(2.4節(1)及び次節参照)。しかし、前述した高橋やF&Pの結果は化学反応では説明できない。電解法による異常発熱現象に関しては、現在札幌のNHEラボで確認実験を進めているので近く実験的に結論がでるものと予想される。

4.2 過剰熱とパラジウム・水素系の物性

常温核融合にまつわる諸現象のうち、電解法によるいわゆる「過剰熱(excess heat)」(電解入力より大きな発熱)の発生については、多数のグループが(少なくとも定性的には)再現性のある現象として観測したと報告している。また、過剰熱が発生するための必要条件(十分条件ではない)として、

- 1) 重水素とパラジウムの原子比(n_D/n_{Pd})が ~ 0.85 以上であること
- 2) 電解電流密度が ~ 0.2 A/cm²以上であること
- 3) パラジウム表面が酸化物等で覆われていること

等が挙げられている^{58,60)}。たとえば、第2.1図は、Stanford Research Institute (SRI) のグループ⁴⁹⁾が測定した、過剰熱と n_D/n_{Pd} との関係である。これによれば、過剰熱は $n_D/n_{Pd}=0.85$ 付近から発生し始め、 n_D/n_{Pd} と共に大きくなる。また、IMRA JAPAN⁵⁸⁾も同様の結果を得ている(第2.3図)。第2.2図は、過剰熱と電解電流密度との関係の一例である。電流密度が0.2 A/cm²を超えたあたりから過剰熱が発生しているように見える。ただし、 n_D/n_{Pd} の電解電流密度に対する依存性の測定結果⁵²⁾によれば、0.2 A/cm²の電解電流密度というのは、 n_D/n_{Pd} を ~ 0.85 以上に保つために最低限必要な電流密度に相当する。また、3)に関しては、表面不純物層には、吸蔵重水素の再結合脱離を妨げてパラジウム中の重水素濃度を上げる働きがあると言われている。したがって、最も本質的な条件は1)であると思われる。この条件を念頭に置いて、パラジウム・水素系の物性を概観してみる。

(1) パラジウム水素化物の構造

第4.8図は、パラジウム-水素系の圧力-組成等温線(pc isotherm)である⁷²⁾。中央の破線で囲まれた領域(平衡圧が組成によらずほぼ一定の領域)では、 α 相すなわち水素濃度の低い相と β 相すなわち水素濃度の高い相とが共存する。両者の構造は、格子定数の違い(室温、二相共存領域においては α 相: 0.3894 nm、 β 相: 0.4025 nm³⁶⁾)を除けば基本的に同じであり、面心立方格子をなすパラジウム原子の八面体格子間位置(第4.9(a)図)を、水素原子がランダムに占有している。もし、すべての八面体格

子間位置に水素が入れば、パラジウムと水素の比は1:1となり、結晶全体としてはNaCl型の構造をとる。しばしば、金属中の水素密度は液体水素より高くなり得ることが強調されるが、八面体位置間の距離はパラジウム原子間の距離(0.29 nm)と同じであり、パラジウム中で(重)水素原子間の平均距離が極端に短くなるわけではない(水素気体分子中の水素原子間距離0.074 nmよりもはるかに長い)。

また、第4.8図の平衡圧特性は、通常の実験条件では $n_H/n_{Pd} > 1$ にはなりにくいことを示唆している。実際、電気分解や高圧の実験では、 n_H/n_{Pd} が1を越えたという報告はない。しかし、低温でイオン注入を行った場合はその限りでない。Semiletovら¹⁶⁸⁾は、パラジウムを水素ガス中で600℃に加熱した後、液体窒素中で急冷し、さらに水素イオンビームを注入することにより、 Pd_3H_4 という正方晶($a=0.2896$ nm, $c=0.3330$ nm)を得たと報告している。また、Myersら¹⁹⁴⁾は、41Kに保ったパラジウムに30 keVの D_3^+ を注入し、 $n_D/n_{Pd}=1.6\pm0.2$ という飽和濃度を達成した。(ただし、イオン注入後の試料では、核融合反応は検出されなかった。)さらに、イオン注入後の試料を加熱すると、($n_H/n_{Pd}=1$ の化学量論組成に対して)過剰な重水素は、120K付近という低温で速やかに放出されることを見出した。彼らは、このような速い拡散が起こるためには、四面体位置を占める過剰な重水素の存在が不可欠であると結論している。

理論的にも、結晶構造が本質的に変わらずに $n_H/n_{Pd} > 1$ になり得たとすれば、余分の水素原子は四面体位置(第4.9(b)図)を占めると予想されている。一例として、Christensenら¹⁹²⁾が、effective-medium theoryを用いて水素原子の存在位置及び結合エネルギー等を計算した結果を第4.6表に示す。 $n_H/n_{Pd} > 1$ では、八面体位置のすべて及び四面体位置の一部に水素がはいることがわかる。また、第4.10図は、 $Pd_{27}H_{27}$ というNaCl型格子にさらに水素原子を1個加えた系($Pd_{27}H_{28}$)のエネルギーを、この水素原子と最近接水素原子との距離の関数として表したものである。八面体位置と四面体位置との距離に相当する3.5 a.u. (≈ 0.19 nm)付近で、エネルギーが極小になっている。ただし、この距離はまだ大きく、Christensenら¹⁹²⁾の計算によれば、八面体位置と四面体位置の重水素がDD核融合を起こすためのトンネル確率は、 D_2 分子の場合の 10^{20} 倍にすぎない。さらに、第4.10図は、水素原子間の相互作用が短距離では非常に反発的であることを示している。これは、ひとつの格子間位置に2つの水素原子を入れることが事実上不可能であることを意味している。

(2) パラジウム・水素系の熱力学的性質

第4.11図^{36,38)}は、標準状態の水素(298 K, 1 atmの水素ガス)がパラジウム中に吸蔵された場合の水素原子1 molあたりのエンタルピー変化 ΔH を、 n_H/n_{Pd} または n_D/n_{Pd} の関数としてプロットしたものである(エンタルピー変化 ΔH については後の説明参照)。中央の比較的平らな部分は、 α 相と β 相の共存領域であり、ここでは $-\Delta H \sim 20$ kJ/mol-H程度である。 $n_H/n_{Pd}=0.7-0.8$ では、 $-\Delta H$ は n_H/n_{Pd} の増加に伴って減少するが、 $n_H/n_{Pd} > 0.88$ では急激に増大し、 $n_H/n_{Pd}=0.96$ では $-\Delta H \sim 110$ kJ/mol-Hに達する。 $n_H/n_{Pd} \sim 0.9$ から $n_H/n_{Pd} \sim 1$ まで水素を吸蔵させる過程では、かなりの発熱があっても不思議で

はないが、この濃度(n_H/n_{Pd})領域は、まさに過剰熱が観察される領域である。従って、この発熱が過剰熱とされている場合もあるのではないだろうか？ただし、吸蔵に伴う発熱量はせいぜい1 eV/Pd atom(100 kJ/mol-Pd)の桁であり、もし2 keV/Pd-atom ($\equiv$ 200 MJ/mol-Pd)⁴⁹⁾、20 keV/Pd-atom ($\equiv$ 2 GJ/mol-Pd)⁴⁸⁾というような過剰熱の報告が事実であれば、熱力学的性質だけではとうてい説明することは出来ない。

<エンタルピー変化 ΔH についての補足説明>

深井⁴¹⁾、坂本⁶⁴⁾、池上⁶⁹⁾、山口⁶⁷⁾らは、 n_H/n_{Pd} が1に近い領域では水素の吸収が吸熱反応である、言い換えれば ΔH が正の値をとると述べている。深井は、その根拠として、Baranowskiの実験値³⁶⁾を引用している。(他に文献値は見あたらないので、深井以外の著者もBaranowskiの実験値を念頭に置いているのではないかと思われる。) Baranowskiは、0.2-1.5 GPa, 25-65°Cの範囲で n_H/n_{Pd} を測定し、平衡圧の温度依存性から $h_{rel H(m)} (= \Delta H)$ を求めた。その値は、文献(36)中では第4.12図のように書かれており、確かに $n_H/n_{Pd}=0.88-0.96$ で $h_{rel H(m)} > 0$ になっている。しかし、元々の測定データである平衡圧と温度との関係(第4.13図)を見ると、温度が高くなるほど n_H/n_{Pd} は小さくなっており、これは $h_{rel H(m)} < 0$ であることを意味している。また、Baranowskiは平衡圧と $h_{rel H(m)}$ とから相対部分モルエントロピー $S_{rel H(m)}$ (第4.14図)を求めているが、この値は、第4.12図の $h_{rel H(m)}$ の符号を逆にして(負にして)計算した値とちょうど一致する。すなわち、第4.12図の縦軸の目盛にはマイナスの符号がつくべきだったのが、落ちてしまったものと思われる。従って、第4.11図では、第4.12図の値を符号を逆にしてプロットした。なお、坂本も最近の資料³⁷⁾では、第4.11図と同じようにプロットしている。

上述の大きな $-\Delta H$ は、 $n_H/n_{Pd} > 0.9$ の高 n_H/n_{Pd} 領域で、パラジウム中にエネルギー的に非常に安定な水素の占有位置が存在することを意味している。ここで注目されるのは、深井らが最近行った、5 GPaという高压水素雰囲気でのパラジウム水素化物のX線回折の結果⁶⁵⁾である。彼らは水素化物相の n_H/n_{Pd} は測定していないものの、上記条件下で、パラジウムの金属格子に20%もの空孔が生じ、格子定数が小さくなることを見いだした。また、空孔の配列は秩序的で、金属格子全体としては Cu_3Au 型の結晶構造をとると推測している。一方、パラジウム中の空孔は最大6個の水素を捕獲すること(第4.15図)^{63,70)}が知られており、その結合エネルギーは0.5 eV程度⁷¹⁾と高い。したがって、この Cu_3Au 型の相が、上述のエネルギー的に非常に安定な水素占有位置をもたらしている可能性がある。残念ながら、 $n_H/n_{Pd}=0.8-0.9$ (平衡圧ではおよそ10-1000 atm $\equiv$ 1-100 MPa)の範囲で結晶構造、溶解熱、あるいは圧力-組成等温線を測定した例は報告されておらず、この領域で本当に相転移が起こるかどうか明らかでない。勿論、電気分解の条件下で相転移が起こるかどうかともわからない。また、上述の「 $n_H/n_{Pd}=0.96$ では $\Delta H \equiv -110$ kJ/mol-H」という結果も、非常に狭い温度範囲の少数の測定点(第4.12図)に基づくものであり、その精度には疑問がある。いずれ

にしても、過剰熱が観測されるような高い n_H/n_{Pd} 比での水素とパラジウムとの相互作用について、基礎的な研究を進めることが強く望まれる。

(3) 過剰熱と核反応との相関——山口らの実験について

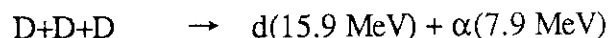
山口ら⁹⁾は、真空法による実験で、過剰熱が発生すると同時にヘリウムが放出されたと報告した。過剰熱の発生は電解法ではしばしば観察され、一方、中性子等の核反応生成物の放出を検出したという報告もあるものの、両者の相関を示す実験結果がほとんどないため、彼らの実験は当初注目を浴びた。実際には、彼らは、通電により試料を加熱するとある時点で急激に温度が上昇し、引き続いて ^4He が放出される現象を見出し、これを核反応による過剰熱の発生であるとした。しかし、深井⁴¹⁾が指摘しているように、彼らが観察した温度上昇はよく知られたパラジウム・水素系の物性で理解でき、過剰熱の発生を示唆するものではない。すなわち、水素化物相が存在していた始めのうちは、水素の放出に伴う水素化物相の分解（吸熱反応）が起こり温度上昇が抑えられていたとすれば、彼らの実験結果を説明できる。したがって、温度とヘリウム放出との相関についても、ヘリウムを生成する核反応が起こったために熱が発生して温度が上昇したわけではなく、温度が上昇したためにヘリウムが放出されたと見るのが妥当であろう。山口自身も、最近の論文^{66,67,68)}では、過剰熱という言い方はしておらず、「発熱現象は、未知の物性的メカニズムに起因すると考えられる」としている⁶⁷⁾。（ただし、山口らの実験では、試料への入力も試料からの出力も測定されていないので、「発熱」があったかどうかさえ明確でないことにも注意する必要がある。）ヘリウムの検出については、彼らの論文を見る限り事実と思わざるを得ないが、その起源についてはなお検討が必要と思われる。結論として、過剰熱と核反応との相関を明確に示す実験データはいまだ存在しないと言える。

4.3 多体核反応の可能性

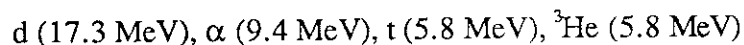
加速器を用いた常温核融合に関する検証実験として、飯田、高橋(阪大)^{23, 73)}、笠木(東北大)^{24, 74)}等の実験があり、金属内で重水素3体反応が起こっている可能性があると報告している。これ等の実験結果について核物理からの検討を行う。

(1) 飯田、高橋等の実験^{23, 73)}

チタン膜ターゲットに240keVの重陽子を入射させた結果、通常のD+D反応の他に、7MeVと3MeV付近にピークが現れ、これが重水素3体反応



によるものではないかとしている。上の反応の括弧内に示された粒子エネルギーは重陽子のエネルギーが非常に低い場合の値であって、実際に240 keVの重陽子入射にたいしては、これらの実験で測定した0°方向での各粒子のエネルギーは、それぞれ



になる。文献(23), (73)は共に240 keVの重陽子を入射させた実験であるが、得られたエネルギースペクトルは2つの間でかなり異なった様子を示している。文献(23)では9.4 MeVの α 粒子の5 μ mのチタン膜によるエネルギーロス0.8 MeVを考慮すると、8.6 MeV付近に α 粒子に対応するピークが現れるはずであるが、観測されたスペクトル上には6.6 MeVの所に小さなピークが1本見えるだけである。このようにターゲット試料のチタン膜によるエネルギーロスを考慮しても、重陽子3体反応によって発生すると思われるそれぞれの粒子のエネルギーに相当するピークを観測されたスペクトル上に見いだすことはできない。これらの測定データは統計が十分とは言えず、D+D+D反応を確認するためには10 MeV以上のエネルギー領域での測定が不可欠である。

(2) 笠木等の実験^{24, 74)}

笠木らは、重水素を吸蔵させたチタン棒(TiD₂)を150 keVの重陽子で照射して荷電粒子エネルギースペクトルを測定したところ、通常のD+D反応では説明できない最高エネルギー17 MeVまでにわたる連続陽子分布と7.5 MeV以下の連続 α 粒子スペクトルを観測したと報告している。これ等の結果は、通常では考えられない3個の重陽子の同時反応がチタン金属内で生じている可能性を示唆するものであると主張している。

ここではD+D反応に関して最も起こり得ると考えられる反応について、発生する粒子の方向と持ち得るエネルギーを反応の運動学 (reaction kinematics) により検討した。

D+D反応から陽子と ^4He を発生させる反応は、逐次2段階核反応としての次の2系統のものが考えられる。それは、入射粒子aが標的核Xに衝突してb粒子が放出され、残留核Yができる核反応を $X(a, b)Y$ と書き表すと、

・ $D(d, n)^3\text{He}$ 反応で発生する ^3He を入射粒子とする $D(^3\text{He}, p)^4\text{He}$ 反応($Q=18.35\text{MeV}$)

・ $D(d, p)^3\text{T}$ 反応で発生する ^3T を入射粒子とする $D(^3\text{T}, n)^4\text{He}$ 反応($Q=17.59\text{MeV}$)

である。1次反応で発生する ^3He や ^3T はその放出される方向によって異なったエネルギーを持ち、また2次反応で放出される陽子や α 粒子のエネルギーも放出される角度によって異なる値をもつので、或一定角度で観測される陽子や α 粒子のエネルギーは一定にならずに広がりを持つことになる。ここで笠木らが測定した135°と155°での放出粒子のエネルギーを計算して見ると以下のようになる。

$D(^3\text{He}, p)^4\text{He}$ 反応では

135° に放出される陽子のエネルギーは	12.9-16.9 MeV
α 粒子のエネルギーは	1.7-6.0 MeV
155° に放出される陽子のエネルギーは	12.4-16.7 MeV
α 粒子のエネルギーは	1.4-5.8 MeV

$D(^3\text{T}, n)^4\text{He}$ 反応では

135° に放出される α 粒子のエネルギーは	1.5-6.2 MeV
--------------------------------	-------------

155° に放出される α 粒子のエネルギーは 1.2-6.0 MeV

このように通常の逐次2段階核反応によっても約17 MeVまでにわたる陽子エネルギーと6.2 MeVまでの α 粒子エネルギーを取り得ることができて、実験結果をほぼ説明することができる。

また一次反応で発生する ^3He や ^3T はチタンと核反応して α 粒子を発生させる。



これら2つの核反応のQ値から、発生する α 粒子も金属内のエネルギーロスで減速され約8 MeV以下の連続スペクトルを示す可能性がある。

3個の重陽子の同時反応は非常に考えにくい反応である。文献(75)で述べられているように、「3個の重陽子同時反応の収量の予想が、実験で得られる収量の 10^{12} 倍」ということは一般にはあり得ないと考えるのが普通であろう。勿論、実験的検証・確認のためには陽子、中性子、 α 粒子の3個の同時測定が必要である。しかし、これまでの観測結果は、上述のように他の核反応によっても説明できそうであり、これ等の実験結果から直ちにD+D+D反応が起っていると結論することは出来ない。

第4.1表 電解セルを用いた過剰熱測定法

方式	セルの構造・特徴	過剰熱, $Q_r(W)$ の算出法	特 徴	代表例 (名称)	文献
開放型	デュワーセル型 (第4.1図)	セル内にヒータを内蔵し、所定の熱を与え検量線を作成し、系の温度変化から Q_r を算出	・実験装置は比較的安価 ・実験操作容易 ・重水の補給必要 ・熱収支の評価複雑 ・D/Pdの in-situ 測定困難	Fleischmann/pons F/P 方式	34 47
	バブリング フラスコ型 (第4.2図)	上記と同様に検量線を作成し、外部から一定温度の冷却水を流し、入口と出口の温度差から Q_r を算出		高橋方式 (阪大) パルス電解法	48
密閉型	O_2 , D_2 ガスを再結合させるための触媒を内蔵 (第4.3図)	同上。一般にフローカロリーメトリ法と呼ばれ、過剰熱測定では本方法が最も多く採用されている	・実験装置複雑 ・熱収支の評価比較的容易 ・D/Pdの in-situ 測定可能	Mckubre (SRI) Storms ((LANL)	49 50 51
	アノードにガス拡散電極使用、酸素発生無し (第4.4図)	入力電力とカソード電極 (Pd, Ni) の温度変化の関係から Q_r を算出		国松(IMRA JAPAN) I/J 方式	52 53

第4.2表 代表的な重水電解法による過剰熱測定結果例^{5, 13)}

研究者	(所属)	電 解 条 件		カソード電極 (Pd)の 形状及び体積	過剰熱測定法 (4.1 表参照)	過剰熱発生量 (Q_r)と D/Pd	備 考	文献
国松敬二	IMRA JAPAN	電解液量(cm^3) (L100 濃度)	電流密度 i (mA/cm^2)	温度 $^{\circ}\text{C}$	密閉型 I/J 方式	max. 50% (D/Pd=0.89) (5 W/ cm^3)	D_2 ガス7 atm Q_r 発生条件: D/Pd>0.83-0.84 i> 100 mA/cm^2	52 53 59
高橋亮人	阪大	約 150 (1 M)	50, 1000	10, 30	開放型 高橋方式	平均32W 2ヵ月 100 W 2 回	L, Hモード6 時間毎	48
太田健一郎	横浜国大	700 (0.3 M)	L: 0.2-0.4A H: 4.0-5.0A	20	密閉型 7a-加リトリ-	5-13%	機械的処理した電極のみ 1 ヶ月後から発熱	55
小山 昇	東京 農工大	50 (0.1, 1 M)	200-1000 (10W一定)	5, 23	密閉型 双子型 加リトリ-	2.4 - 2.7% 0.31-0.52W/ cm^3	電解開始12日後から発熱 DC + AC	54
Fleischmann Pons	IMRA E.	約100 (0.1 M)	0.2, 0.3 W (1xV一定)	8	開放型 F/P 方式	144.5 W 約3.7 kW/ cm^3	D_2 O 50ml (2.5M)が10分間 で蒸発	34 47
McKbure	SRI Int.	200 (D_2 : 1atm) 200 ppm Al (1 M)	440 (5 A)	30 (通常)	密閉型 7a-加リトリ-	1.2W(4.2W/ cm^3) 全過剰熱: 4.3 MJ/ cm^3	D/Pd>0.85 で過剰熱発生 高D/Pdの保持: Al, Si を電解液に添加	49
Storms	Los Alamos National Lab.	- (D_2 : 1 atm) (0.3 M)	20-420 (0.13-2.8A)	19	密閉型 7a-加リトリ-	7.5 W (20%)	Q_r 発生: D/Pd=0.82 田中貴金属Pdシートの #1のみ発生	50 51
Miles Bush	Naval Air Warfare Center	18-20 (0.1 M)	200, 250	23	開放型 F/P 方式	0.02-0.08W	^4He の生成: $10^{11}-10^{12}/\text{s} \cdot \text{W}$	56 57

第4.3表 D/Pdと過剰熱の再現性

D/Pd	0.87	0.95	1.00
再現性(%)	17	38	100

第4.4表 100万kW級のBWRとの比較

燃料棒	線出力 密度 (kW/ft)	燃料集合体1cm 当り		熱流束 (W/cm ²)	
		表面積(cm ²)	出力 (kW/cm)	BWR 計算値	F/P の値
7 x 7	18.5	220	29.7	135	170
8 x 8	13.4	247	27.7	112	

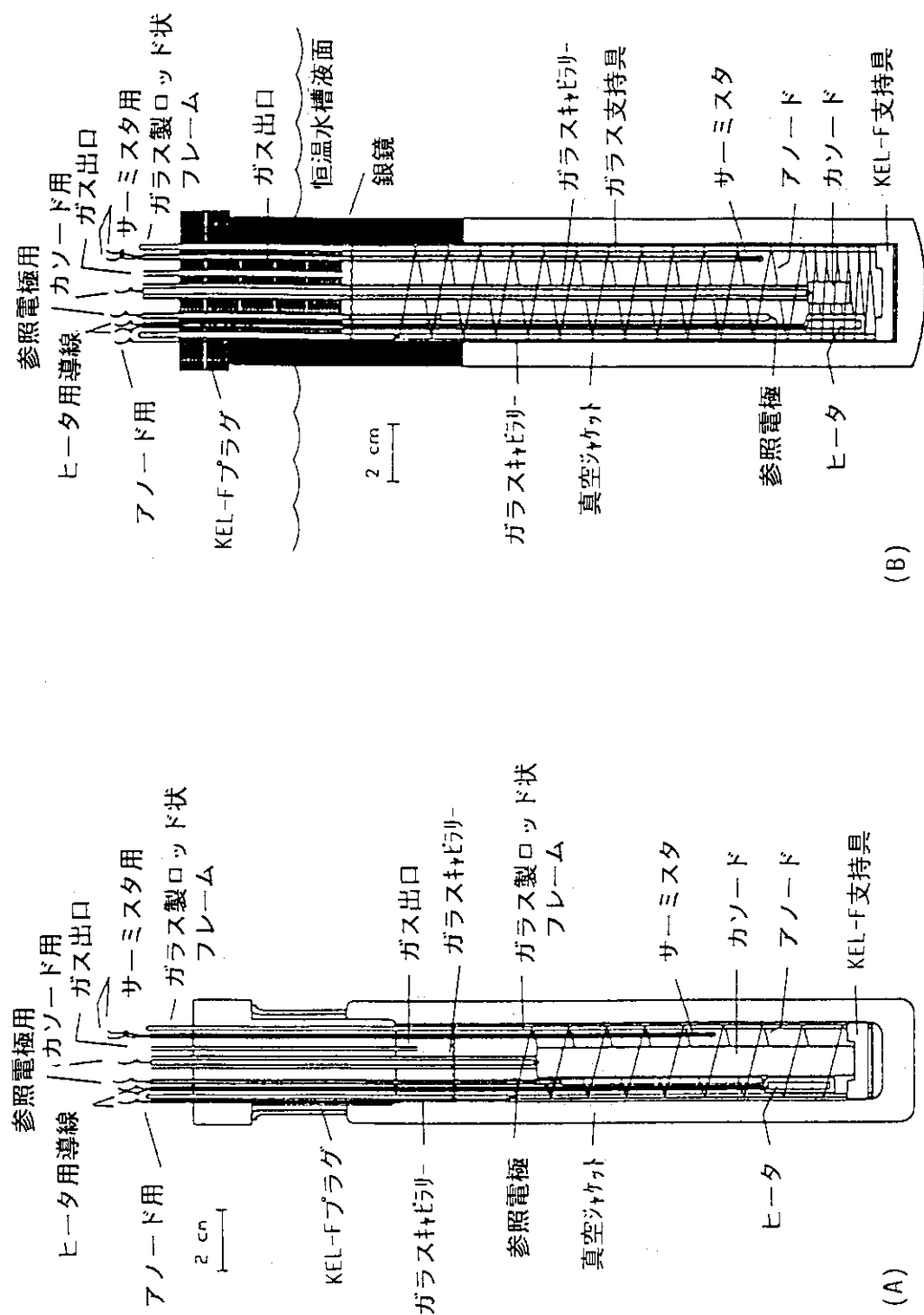
第4.5表 $E_{in}(=-\Delta H/2F)$ の温度及び電流効率(χ_{D_2})依存性の計算値酸素発生の電流効率($\chi_{O_2}=0.9$), 圧力 $P=1.00\text{bar}$

$T/^{\circ}\text{C}$	$E_{in}/\text{V for } \chi_{D_2}$								
	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
25	1.35349	1.37235	1.39120	1.41006	1.42892	1.44776	1.46663	1.48549	1.50435
30	1.35617	1.37527	1.39436	1.41346	1.43256	1.45165	1.47075	1.48985	1.50895
35	1.35938	1.37880	1.39821	1.41762	1.43703	1.45645	1.47586	1.49527	1.51469
40	1.36332	1.38315	1.40297	1.42280	1.44262	1.46245	1.48228	1.50210	1.52193
45	1.36819	1.38857	1.40893	1.42930	1.44967	1.47004	1.49040	1.51077	1.53114
50	1.37436	1.39545	1.41652	1.43760	1.45868	1.47976	1.50084	1.52191	1.54299
55	1.38229	1.40430	1.42632	1.44834	1.47035	1.49237	1.51438	1.53640	1.55841
60	1.39263	1.41589	1.43914	1.46240	1.48566	1.50892	1.53218	1.55544	1.57870
65	1.40654	1.43150	1.45646	1.48142	1.50637	1.53133	1.55629	1.58124	1.60620
70	1.42571	1.45302	1.48033	1.50764	1.53494	1.56225	1.58956	1.61686	1.64417
75	1.45327	1.48396	1.51466	1.54535	1.57604	1.60674	1.64743	1.66812	1.69882
80	1.49524	1.53110	1.56695	1.60280	1.63865	1.67450	1.71035	1.74620	1.78206

第4.6表 種々の(仮想的)PdH化合物の結合エネルギー及び水素の占有位置の計算結果¹⁶⁹⁾

結合エネルギーは、27個のパラジウム原子を含む基本単位に最後に加えた水素原子の結合エネルギーである。

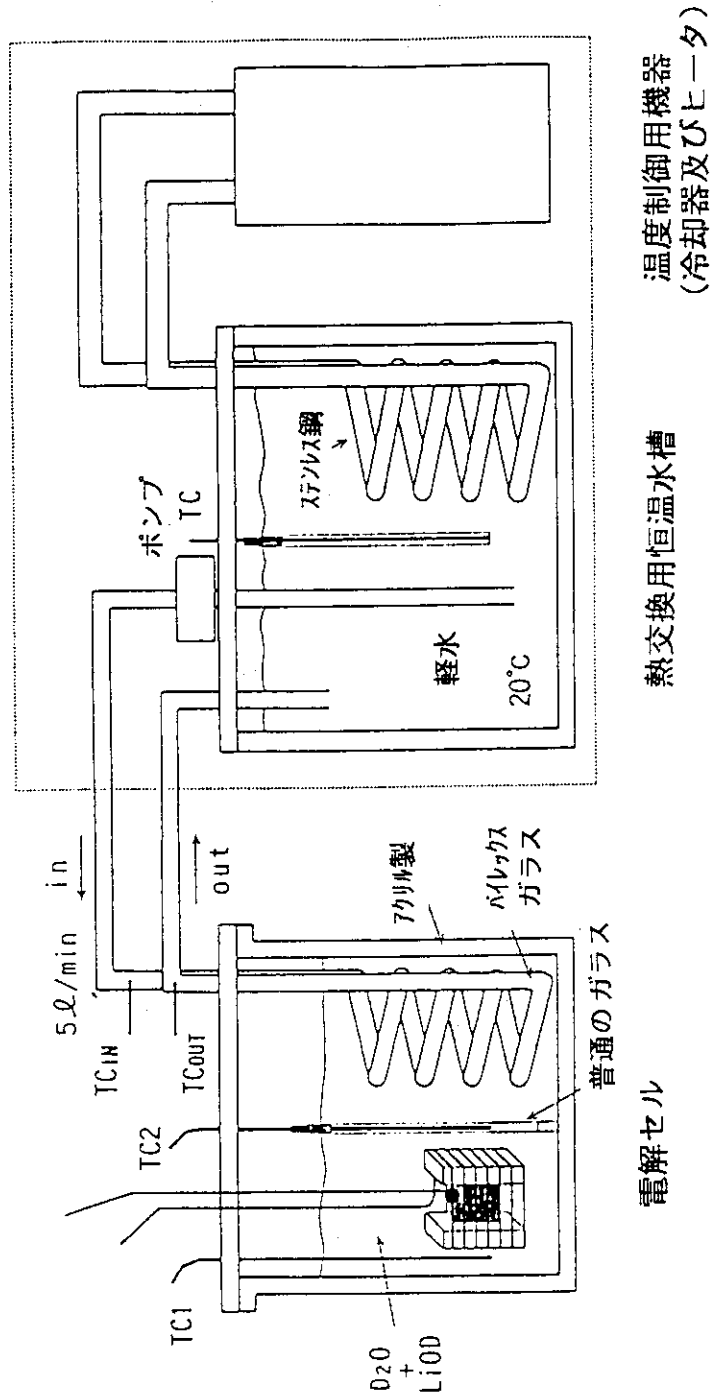
	ΔE	H site
Pd ₂₇ H	-0.12	octahedral
PdH	-0.18	octahedral
Pd ₂₇ H ₂₈	0.46	27 octahedral + 1 tetrahedral
PdH ₂	0.35	1 octahedral + 1 tetrahedral



第4.1図 フライシマン・ポンスのデュワータイプの開放型電解セル

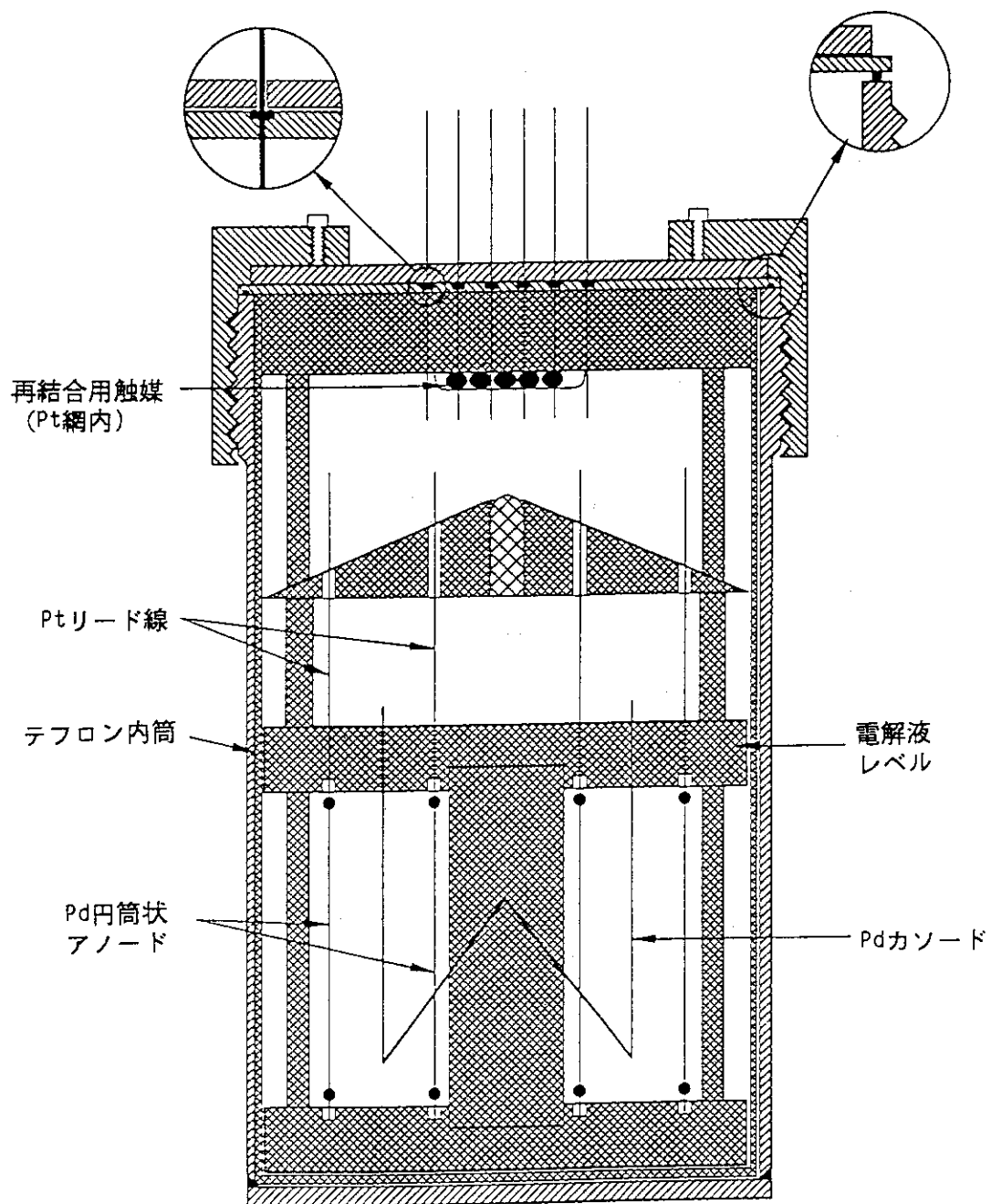
(A): 1989-1990年に使用(熱移動は伝導と輻射)

(B): 最近使用中のセルで上部に銀コーティング(熱移動は輻射)

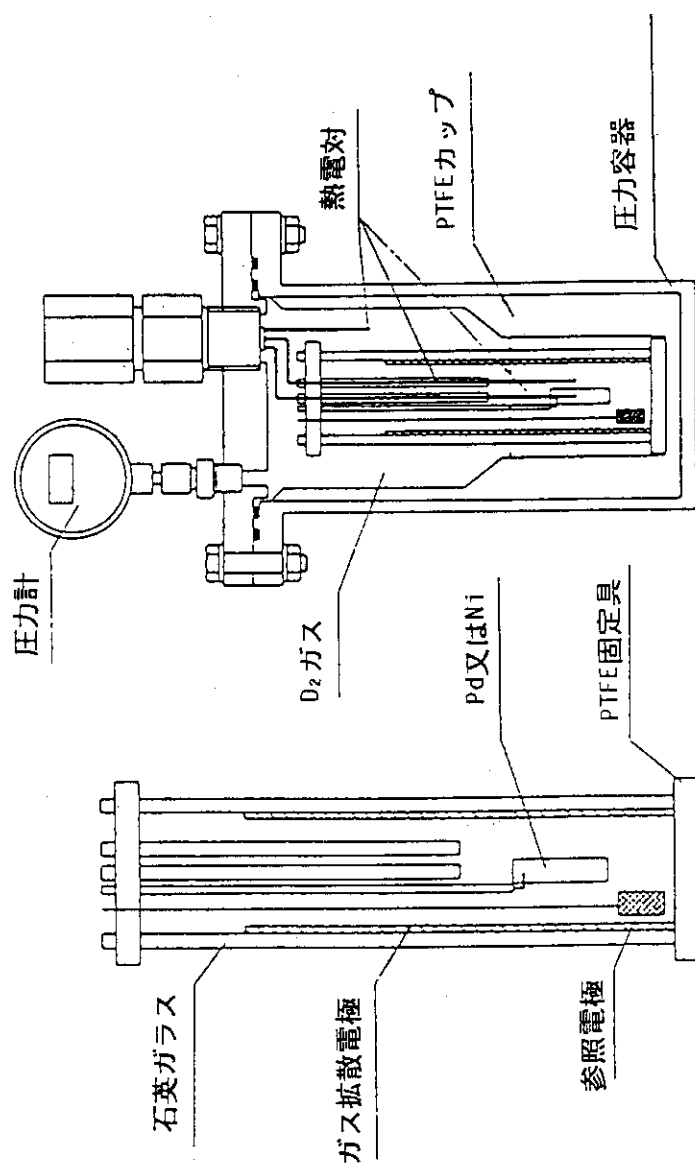


第4.2図 高橋方式の開放型電解セルと冷却系

パラジウム陰極/重水電解において高/低電流密度を交互に負荷する電解法



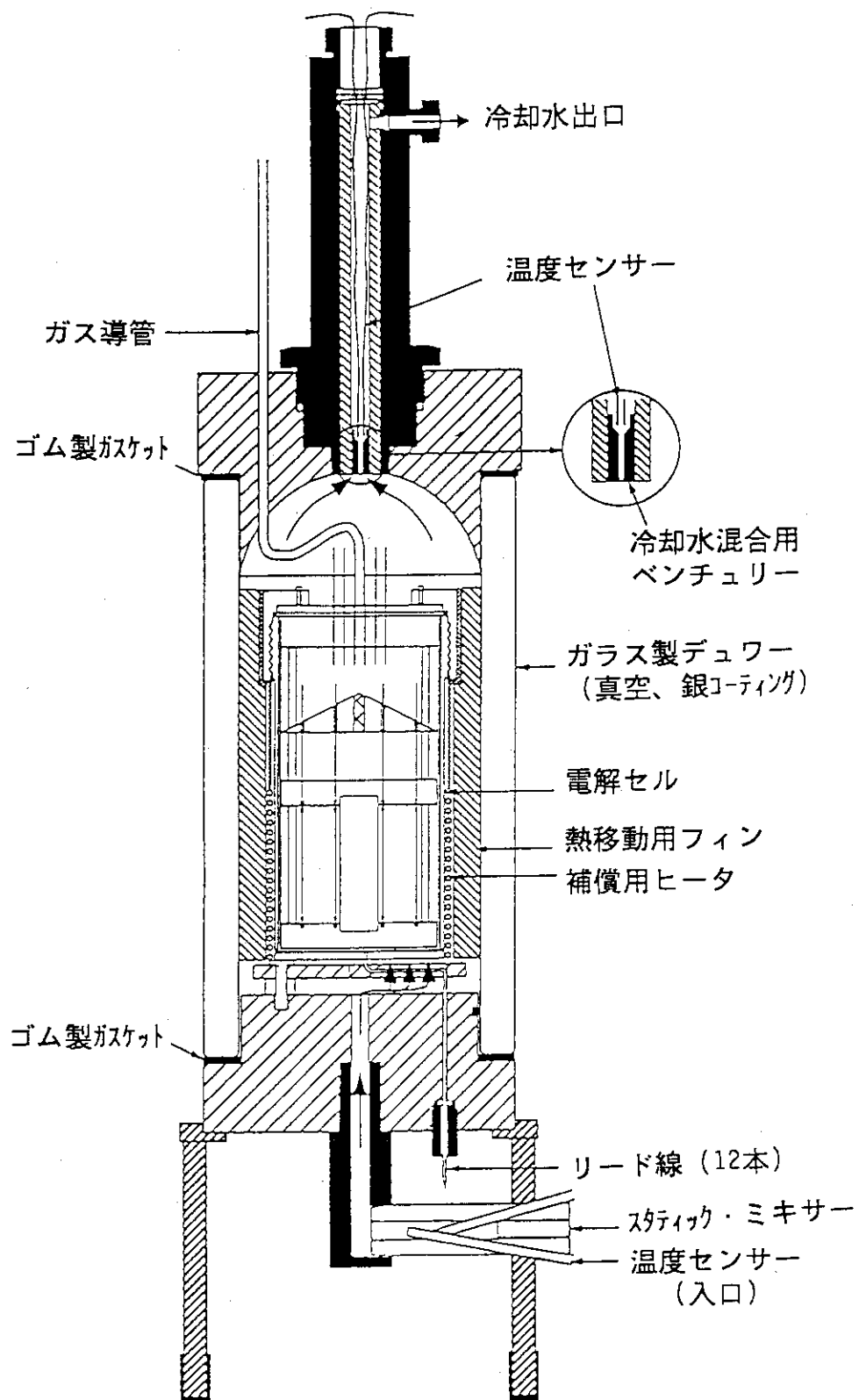
第4.3図 SRIの触媒内蔵型の密閉型電解セル



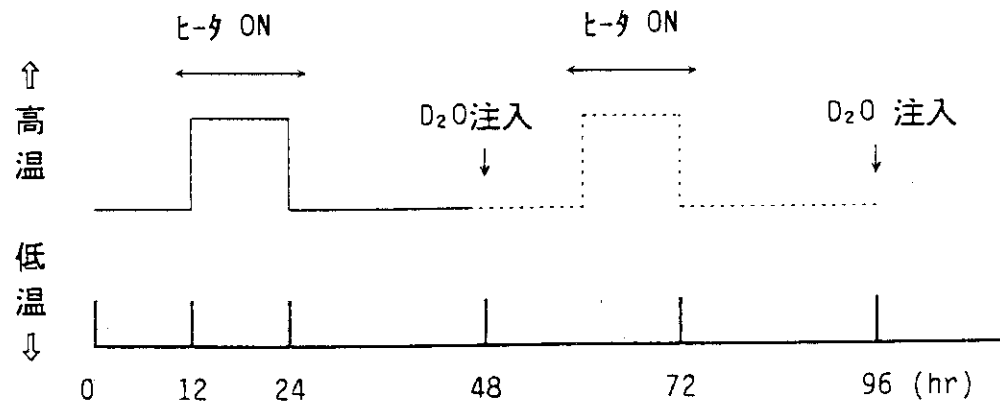
第4.4図 IMRA JAPANの重水素加圧式電解セル

アノードにガス拡散電極を使用した酸素発生が起こらない電解法を採用。

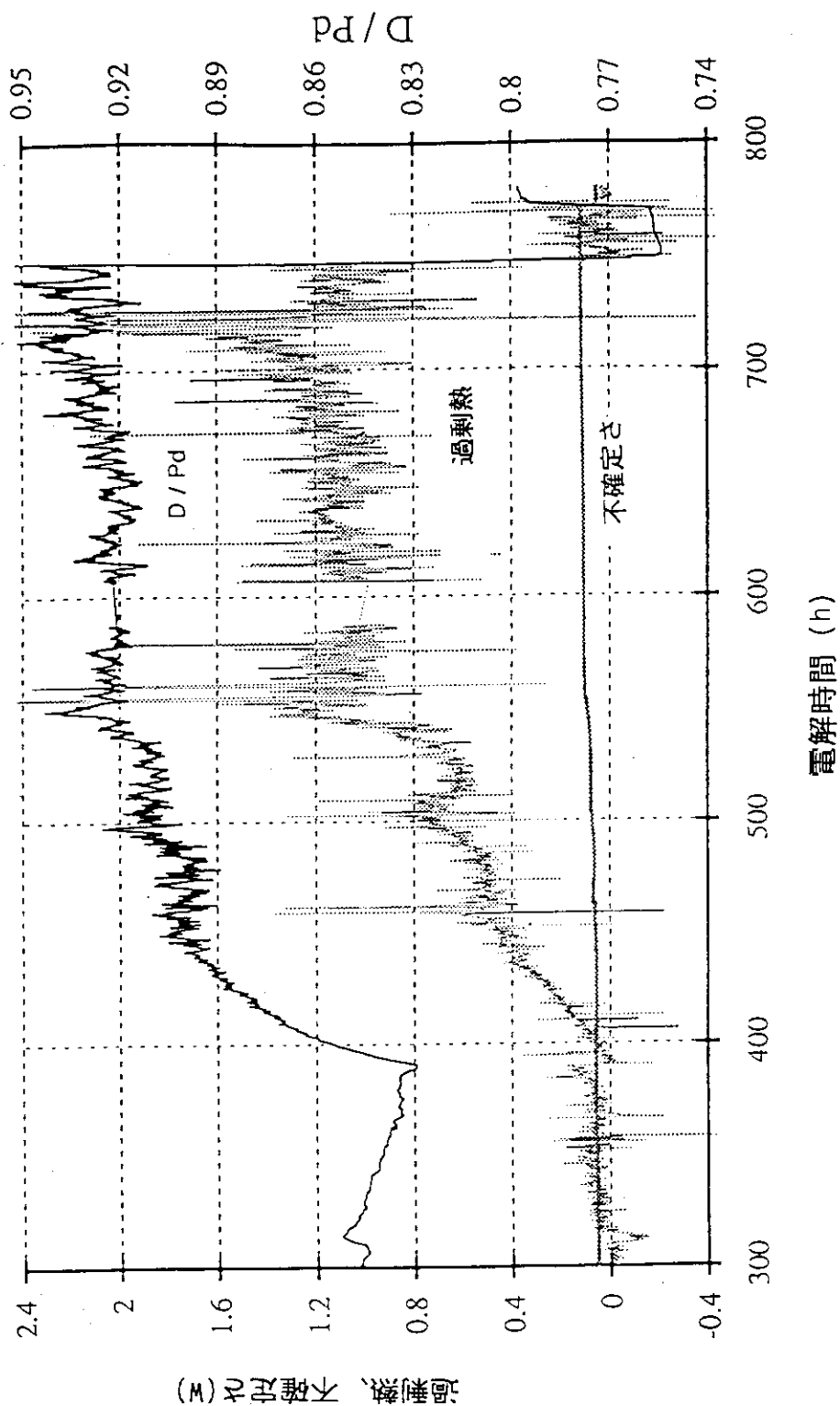
左図はセル内部の電極等の構成拡大図。



第4.5図 SRIの過剰熱測定用カロリメーター
内部に第4.3図の電解セルを内蔵

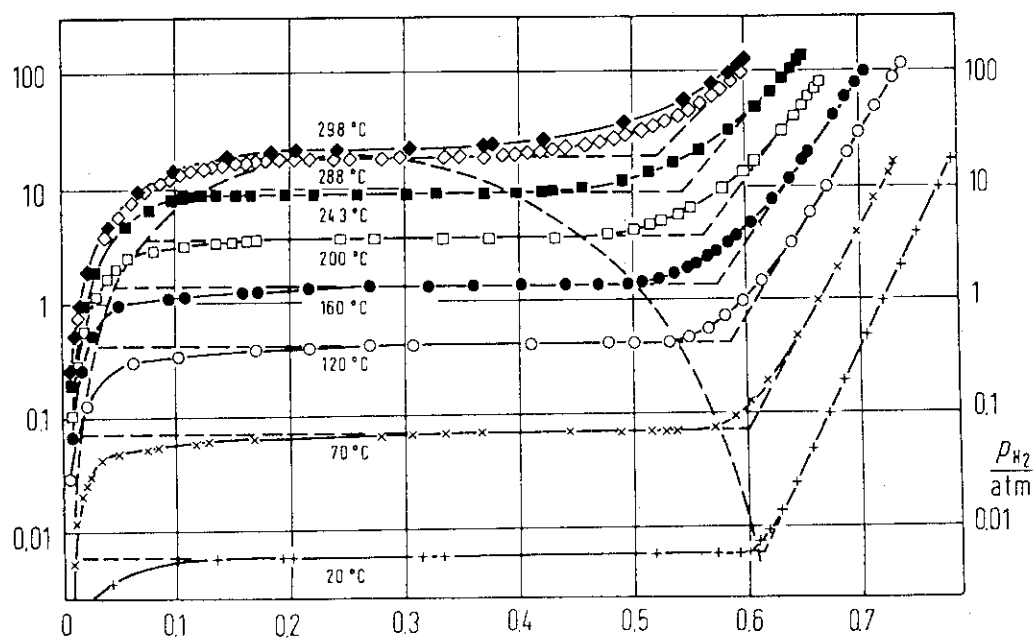


第4.6図 NHEラボにおける電解セルの作動条件



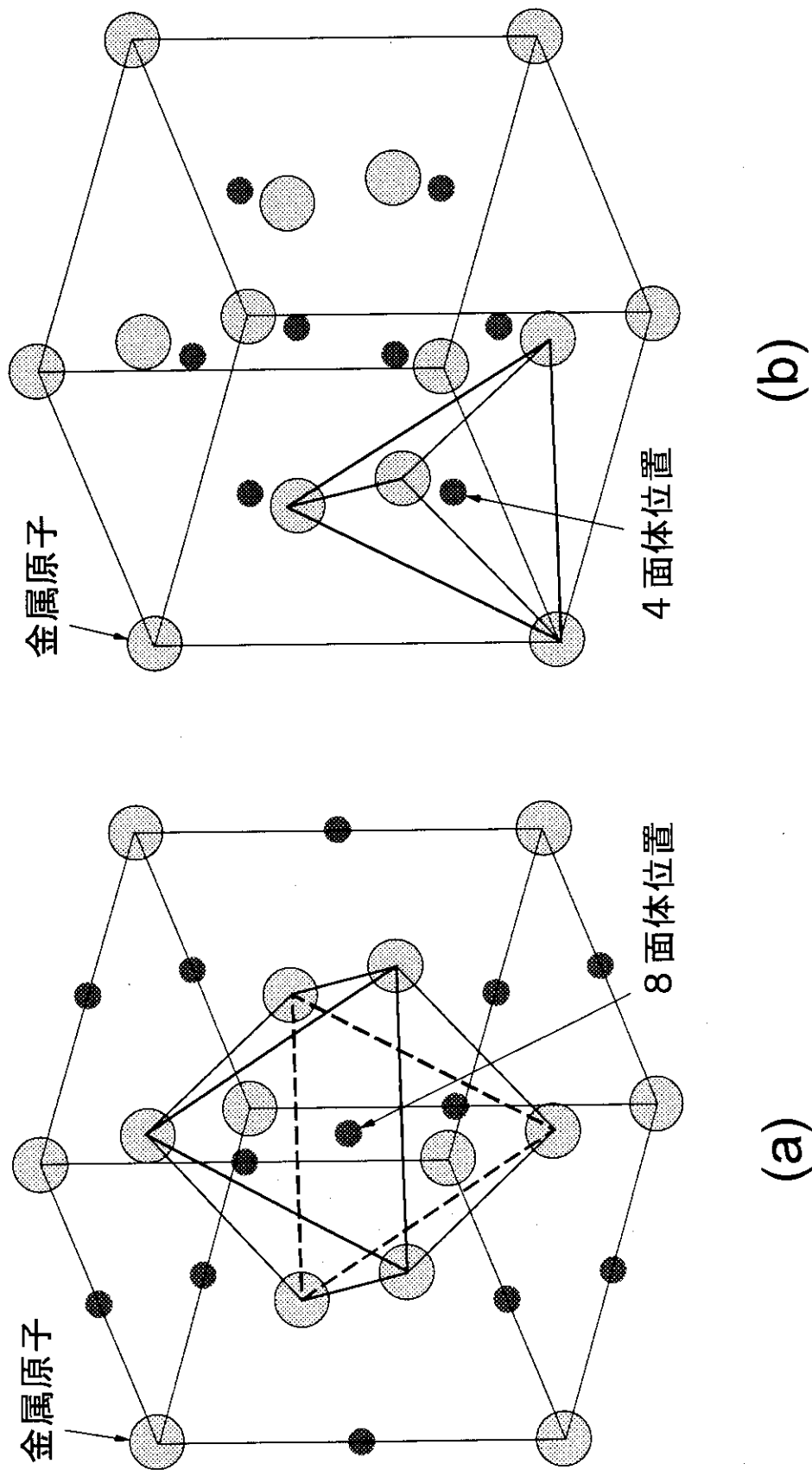
第4.7図 過剰熱及びD/Pdの経時変化(SRI:Mckubre)

500時間以降では電解電流7 A, セル電圧4~6 V



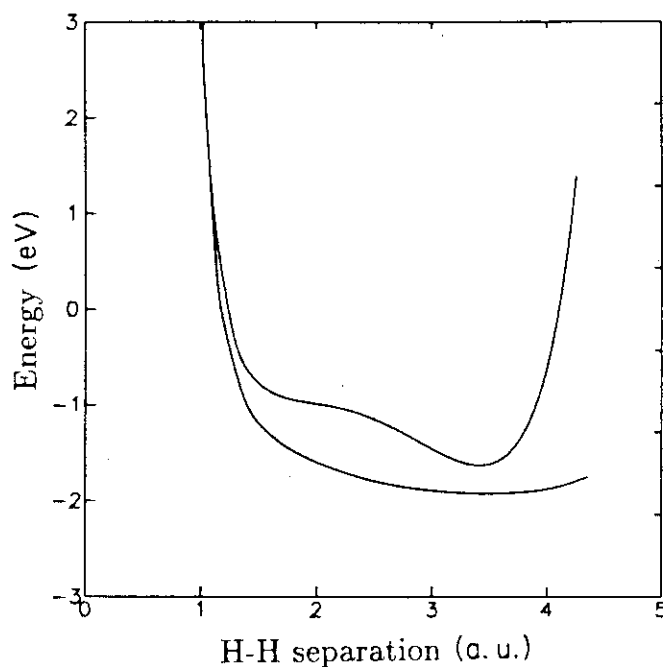
第4.8図 パラジウム-水素系の圧力-組成等温線^{7,2)}

臨界温度(292.2°C)以上では、 α 相と β 相の区別がなくなる。



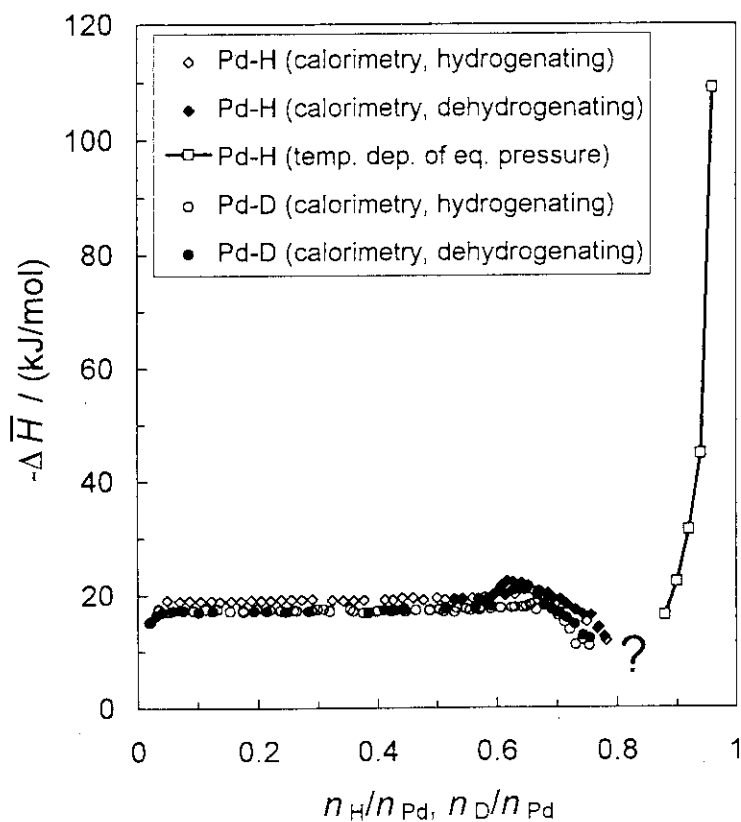
第4.9図 面心立方晶金属の格子間位置

(a)八面体位置。金属原子1個あたり1個存在する。パラジウム中の水素(重水素)はこの位置を占める。(b)四面体位置。金属原子1個あたり2個存在する。

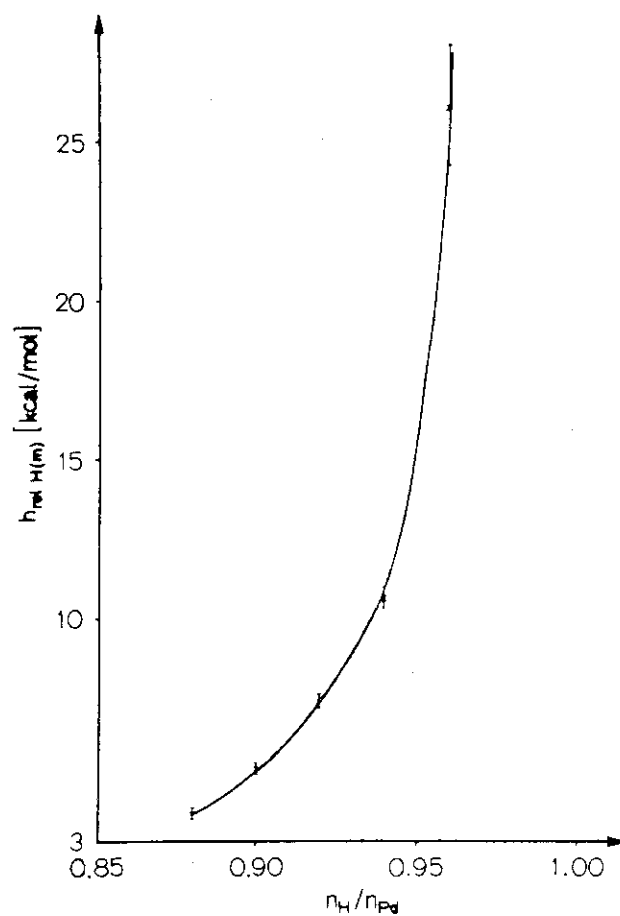


第4.10図 $\text{Pd}_{27}\text{H}_{28}$ (計算に用いた仮想的な単位) のエネルギー¹⁶⁹⁾

27個の水素を八面体格子間位置に固定し、残りの1個の水素原子の位置を変化させてエネルギーを計算した。

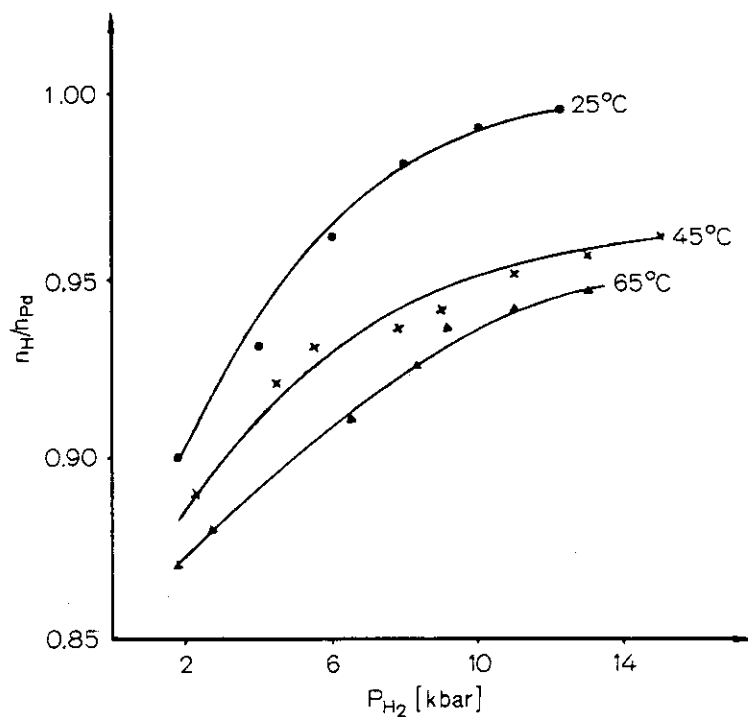


第4.11図 標準状態の水素(298K, 1 atmの水素ガス)がパラジウム中に吸蔵された場合エンタルピー変化 ΔH の、 $n_{\text{H}}/n_{\text{Pd}}$ ($n_{\text{D}}/n_{\text{Pd}}$) に対する依存性^{36, 38)}。 $n_{\text{H}}/n_{\text{Pd}}=0.8$ -0.88ではデータがない。



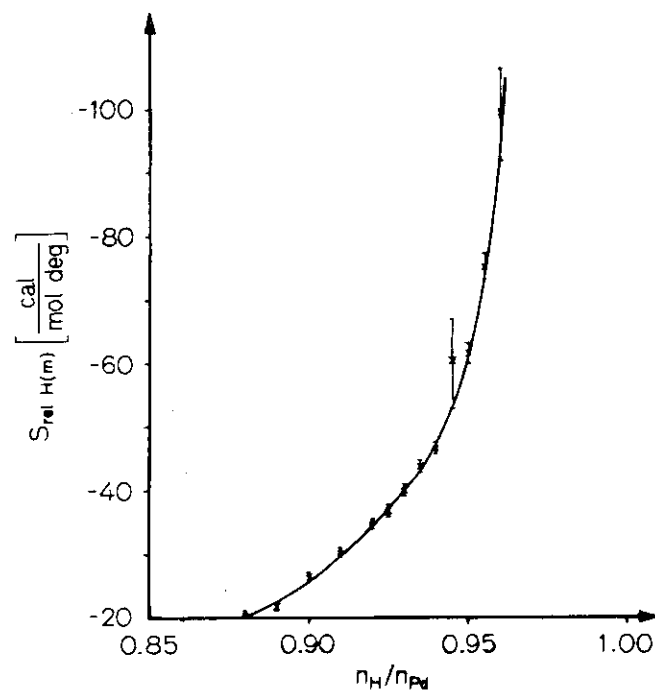
第4.12図 パラジウム中の水素の相対部分モルエンタルピー $h_{rel H(m)}$ の n_H/n_{Pd} 依存性³⁶⁾

縦軸目盛のマイナスが抜けているものと思われる(本文参照)。



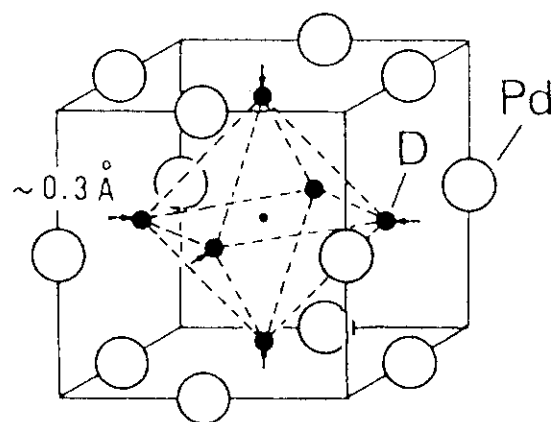
第4.13図 パラジウム-水素系の吸収等温線³⁶⁾

温度が高くなると水素吸蔵率 n_H/n_{Pd} は小さくなる。



第4.14図 パラジウム中の水素の相対部分モルエントロピー $S_{rel H(m)}$ の n_H/n_{Pd} 依存性^{3,6)}

第4.11-12図のデータから求めた値である。



第4.15図 パラジウム中の空孔に捕獲された6個の重水素原子の配置^{6,3, 7,0)}

空孔中に6個存在していると言うよりも、正規の八面対位置から空孔の中心方向にわずかに変位していると言った方が妥当であろう。

5. 核融合反応の実現を目指した 新方法の提案

第3章の常温核融合理論の所で述べたとおり、 D_2 分子は核間距離 $R_0=0.74\text{Å}$ であり、その位置では核同士のクーロン反発力と軌道電子による引き合う力(結合エネルギー)が釣り合っている。D原子核を更に近づけるには、クーロン障壁を越える必要があり、この核力の働く距離は 10^{-4}Å (10 fm)、クーロンエネルギーは300 keVである。D-D融合反応を起こすためには、外力によるエネルギー付与を必要とする。即ち、300 keVのエネルギーで D^+ イオンを加速するか、一億度の高温プラズマを発生させる必要がある。一方、固体物理の量子力学効果としてのトンネル効果が、クーロン障壁をくぐり抜けて原子核同士を融合させる可能性が考えられる。即ち、常温核融合では、固体内に高密度で吸蔵されたD原子核の周囲の正の電界を、電子が如何に遮蔽するかが鍵となる。白色矮星の様な質量の重い天体内部ではプラズマ密度が $10^{26}\sim 10^{27}\text{cm}^{-3}$ で普通の物質密度の $10^3\sim 10^4$ 倍に当たり、平均核間距離は $R_0\cong 0.2\text{Å}$ である事が計算されている。

電気分解法による Fleischmann and Pons (F&P)効果ではD/Pdの充填比が1の場合 FCC-Pd結晶中のDは八面体格子間位置を占有し、その $R_0=2.85\text{Å}$ であり、八面体及び四面体の両サイトを占有する充填比=3では $R_0=1.37\text{Å}$ で、 0.2Å に近接する事は通常の定常状態の物質体系では不可能である。これが、非定常状態としての相転移や結晶内格子欠陥、表面現象などを考える根拠である。

一方、F&P効果以前から既存の物理的知見を否定すること無く説明出来る「常温核融合」が存在していた。ミューオン(μ)触媒核融合である。 D_2 原子核の周りの電子を有効質量200倍のミューオンで置換すれば、核間距離は $1/200$ の $R_0=3.6\times 10^{-3}\text{Å}$ に接近し、前述のトンネル効果が顕著になり、この現象の主要過程が理論で予想されたとおりに起きることは実験的にも実証され、エネルギー収支をプラスにするためのブレーク・スルーの条件が得られている。超伝導体など固体電子系でも「重いフェルミオン, Heavy Fermion」という有効質量の概念があり、自由電子の10倍以上の体系も見出されているが、この分野の物質探索は素粒子の応用技術に関する今後のテーマである。

さて、この章では、ミューオン触媒核融合を除いて、これまでの物理的知見で十分合理的に説明が出来る「常温核融合を実現する方法」の内、最近提案されているものを概観する。

5.1 クラスタービーム利用の核融合

マイクロ・クラスターを用いる核融合反応の発想は、1963年に Wintenberg 及び Harrison による。LiやBeの超微粒子(約 10^5 個の原子集団)を 10^7cm/s の速度に加速して重水素を含んだTiDの様なターゲットに当てると、衝撃波が生じ、固体中に 10^8K の高温状態が短時間中に生成し融合反応が起こる。併しこの様な超微量粒子の加速は、

加速条件を決定する粒子の電荷と質量比 (q/M) が電子(e^-)やプロトン(H^+)に比べて殆どゼロに近いから、現存の加速器では困難視されていた。

1989年BNLのBeuhlerらは¹⁵⁹⁾、重水のマイクロクラスターイオン($(D_2O)_n^+$ ($n=25\sim1300$))をTiDターゲットに200~325 keVで加速して、 $D+D\rightarrow p(3\text{ MeV})+^3T(1\text{ MeV})$ の融合反応を検出した。 $n=100$ 、 $E=300\text{ keV}$ の時、3 MeV陽子を約1~10/D-D対/sの反応率で観測した。これはd-d 反応断面積の推定値より 10^{10} 倍高いことから、温かい核融合 (Warm fusion) と呼ばれた。この反応機構に対し、固体内原子衝突の理論から、以下の様なプロセスが考えられる。即ちクラスターイオンの先端がターゲット表面に達した後、クラスター構成粒子がそのままの速度で進み、固体内部の、めり込み部分に密度の高い領域が出来る。クラスター構成粒子 (D, O原子) に働く阻止能は、近接効果のため、単独粒子に比べて大きく、クラスター直径程度進む間にエネルギーを失い、クラスター体積と同じ程度の体積が高密度の衝突領域となる。この密度変化は音速で伝播し、音速が衝突領域の径を走る時間が、閉じ込め時間となり、準熱平衡状態に達する。300 keVの $(D_2O)_{100}$ の全エネルギーが衝突領域内の約 10^3 個の原子に配分されると仮定すると衝突領域の温度は $\sim 500\text{ eV}=5\times 10^6\text{ K}$ と見積もられ、Warm fusion と言われる所以である。

スタンフォード大学¹⁶⁰⁾やリオン大学^{162,163)}による追試実験が $(D_2)_n^+$ 、 $(N_2)_n^+$ 及び $(CD_2)_n^+$ クラスター・ビームを用いて、重水素化したTiやポリエチレンターゲットに衝突させて、(D, D) 反応速度の増加性に関する検討がなされた。1 keV/D以下の重水素原子を含むクラスターイオン($n\geq 100$)では、核融合は検出できず、放出される3 MeV陽子の実験上のバックグラウンドの上限として、クラスター衝突当たり 10^{-13} の収率を報告した。即ち、 10^{-6} 程度の不純物ビームとして軽い D_2^+ 、 D_2 、 O^+ の混入が反応を起し、加速中に残留ガスと衝突して D_2^+ 、 D_2O^+ などが10 keV以上の加速エネルギーになると、問題となることを指摘した。BNLグループも、加速器系の分析マグネットの精度の欠陥を認め、D原子を含む25 amu以下の質量成分が混入して、2桁収率を高く報告していた事を認め、自己否定の論文を発表し、再実験を行う事を述べている¹⁶¹⁾。クラスター核融合実験は、ビームのクラスターサイズ分布の精度を向上させた上での実験が望まれている。

5.2 核分裂片、重イオン照射による核融合

クラスタービーム利用の項で述べた如く、重水素化合物に高エネルギー重イオンを照射すると、原子衝突のカスケード過程により、低エネルギーのDのフラックスが増大し化合物中に融合反応が起こる。また、 ^{235}U を含む重水素化合物をターゲットにして熱中性子照射を行えば、Uの核分裂片が化合物中に生成し、 $\sim 100\text{ MeV}$ 程度のIビーム照射と同等の過程が期待される。原研及び東北大金研の共同チームは、 UTi_2D_x ($x=4.5$)ターゲットに原子炉からの中性子照射により、核融合反応による2.45 MeV高速中性子のピークが確認された。

更に、 ^{235}U の核分裂片のシミュレーションとして、タンデム重イオン加速器からの

90 MeV I^{1+} を $TiD_{1.8}$ ターゲットに照射して、D-D核融合反応による3 MeV陽子及びブロードな中性子の検出に成功した。これは入射イオンの飛程9 μ m近傍の衝突カスケードにより、 TiD_x ターゲットより放出される D^+ イオン同士による衝突過程の効果として、この現象を理解することが出来る。

5.3 強誘電体の相転移に伴うトンネル効果利用

水素結合型強誘電体 KH_2PO_4 は相転移温度 $T_c=123$ Kを示し、 PO_4 の酸素原子から4個の水素結合を出してネットワークを形成する。この水素結合には、2つの平衡位置($\Delta R=0.45$ Å)があり、 T_c 以上では各々に1/2の存在確率を示し、 T_c 以下では何れかの位置に局在している事が確かめられている。このHをDで置換した KD_2PO_4 は相転移温度が $T_c=222$ Kまで異常上昇を示す。その解釈として水素は2つの位置の間を力学的に運動しており、相転移で水素間に格子振動と同じ集団運動モードが生じて不安定となるソフトモードが見出され水素の波動関数は2つの平衡位置に同時に存在する「トンネル効果モデル」によっている、とされている。この水素イオンのトンネル効果現象を利用してモスクワ大のLipson等は KD_2PO_4 単結晶の $T_c=222$ K近傍で温度サイクル($\Delta T \div 4$ K)を行い、中性子(0.75 n/s)及びトリチウム(6×10^9 T/g結晶)の発生による核融合を検証した^{27,164)}。強誘電体の自発分極による電場により重水素イオンは ~ 10 eV程度の加速であり、 $\lambda_{\text{eff}} \sim 10^{-20}$ s/D-D対。このときマルチフォノン励起効果によりD(D,T)pチャンネルの優勢な核反応、即ち($n/T \sim 10^{-7}$)が説明されている。

今後Dの充填比の増加が制御可能な結晶では相転移に伴う 10^8 V/cmの強電場や、結晶クラッキングによる1~10 keV以上のDイオン加速の可能性を秘めて居り、興味ある研究対象である。

5.4 ソノルミネッセンス機構

液体中に超音波(~ 10 kHz)を通すと、液体中にキャビテーション(気泡)が発生し、超音波と同期して膨張・収縮を行う。収縮期にキャビティ中の気体が断熱圧縮されて、高温・高密度状態になり、その脱励起過程で発光する。即ち、超音波エネルギーが断熱圧縮過程を通してキャビティ分子へのエネルギー集中度が 10^{11} 倍の値になる事が、Barber等により示され¹⁶⁵⁾、気体温度の直接測定では 5×10^4 Kの値が得られている。K.Fukushima(上越教育大)によると、 D_2O 中に、微粒子(Pd or Ti)に吸蔵させた D_2 ガスに対し1気圧の D_2O 中の半径 R_0 の気泡を印加超音波(振幅4気圧、 $f=10$ kHz)で、 R_0 が10 μ m以下の時に 10^7 Kに達する計算結果を得た^{141,166)}。この温度はキャビティ気体 D_2 ガスが検出可能な核融合を引き起こすに十分な程度で、1気泡当たりfusion数は 10^3 と見積られsono-fusion(音響核融合)の可能性を示唆している。

5.5 クラック・モデル機構^{132,166)}

Ti金属を D_2 ガス10気圧程度のボンベ中に充填してDを吸蔵させた後、77 Kに冷却し、徐々に室温まで昇温させると、中性子バーストが観測できる。TiはDの充填に伴い

HCP(α 相) $\rightarrow\alpha+\beta$ 共存相 $\rightarrow$ BCC(β 相) $\rightarrow\beta+\gamma$ 共存相 $\rightarrow$ FCC(γ 相)と5段階の構造相転移を行い、 TiD_2 ($a=4.44\text{ \AA}$)の面心立方格子を形成する。この γ 相を室温から77 Kへ冷却すると、正方晶 (γ 相, $a=4.51\text{ \AA}$, $c=4.27\text{ \AA}$) へ相転移を行う。さらに、 $c/a=0.945$ の γ 相から室温へ昇温すると、 $T_c=310\text{ K}$ の正方晶 $\rightarrow$ 面心立方晶への相転移に漸近するまで、格子にクラックが発生し結晶は微粉末化する。亀裂に伴う発生電圧を10~30 keVに仮定すると、この反応はhot-spotな核融合と見なすことができ、クラックの囲りの高電圧の発生がマイクロ加速器の機構となり加速 D^+ イオンによる融合反応と考えられる。金属水素化物では一般に金属に比較して1桁抵抗率が増加するが、クラック面で発生し得る高電圧値が問題である。

6. まとめ

1991年原子力工業の誌上¹⁾で原研として「Fleischmann & Ponsの常温核融合」に否定的見解を示して以降今回のレビューまでに、次の4つの動きがあった。即ち、

- ①通産省が中心になって新水素エネルギー実証研究プロジェクトとして、電気分解法による「常温核融合」研究を開始した。
- ②ICCF-3に於いて「常温核融合」を再確認する結果が高橋（阪大）、山口（NTT）の両氏から出され、これに対して「発生した熱は水素吸蔵合金の溶解熱で説明出来る」とする深井氏（中央大）の反論⁴⁾が出された。
- ③「パラジウムへの重水素吸蔵による常温核融合」を説明する前提の1つである「固体中の多体反応」の可能性を、高橋(阪大)、笠木(東北大)が加速器を使用した実験で示した。
- ④従来の科学的知見と矛盾した説明を要する「パラジウムへの重水素吸蔵による常温核融合」ではなく、核融合反応の実現を目指した新たな方法の提案が出て来た。

本報告の目的で述べたとおり今回のレビューでは、上記の4つの動きに対する原研の検討結果を第2章から第5章で示した。ここでは、まとめとしてこれらの動きに対する見解を述べる。

まず、第1点については、現在も進行中のプロジェクトであり結論は未だ発表されていない。実験の内容については、第4章の4.1節に詳しく述べられている。その目的は表面上は水素エネルギーの利用であり、パラジウム・水素系の特性の解明は固体物理学上意味があるかもしれないし、またパラジウム合金等への水素吸蔵過程において、溶解熱等により見かけ上過剰熱として得られるのであれば、パラジウムを「電池」等のエネルギー変換への応用として利用出来る可能性は否定出来ない。

第2点については、第4章の4.2節で述べられたように、水素吸蔵率(D/Pd)が1.6までの領域でのパラジウム水素化物において、核融合反応率が特に高くないとの実験報告¹⁹⁴⁾がある。またパラジウム・水素系の物性の問題として捉えたときにも、水素吸蔵率(D/Pd)が1.0を越えた領域での物性は現時点で不明確ではあるが、1.0以下の領域における発熱現象については、溶解熱で説明出来る可能性が極めて高い。さらに、核融合反応の証拠である放射線の検出が全くなされていないことの説明は、多体反応であることをよりどころにしている。しかし、多体反応であるとしても核融合が起これば、2.4節で述べたとおりX線等の放射線は（物理学を否定しない限り）必ず発生する。僅か1Wの過剰熱が核融合で得られているとしても、装置近傍の人にごく短時間で重大な放射線障害が現われる程の中性子が発生する¹⁹⁵⁾、という事実を考えると、「パラジウムへの重水素吸蔵による異常発熱」は核融合反応によるものではない、と結論出来る。

第3点については、「多体反応が起こっていれば、核反応生成物はヘリウム4だけで、エネルギーは熱の形で発生する」という考え方が、第2点の主張を支持

するものとして扱われている。そもそも多体反応であっても、放射線が発生することは既に述べた。また「多体反応を裏付ける実験データを加速器実験で得た」という報告は、核反応確率が10桁以上も上昇するというものであった。第4章の4.3節にも詳しく述べられているように、これは通常の2体反応の2次反応で、十分説明がつくものであり、これら報告の内容では多体反応の証拠にならない、と結論出来る。

第4点については、既知の概念(磁気核融合, 慣性核融合, 等)と異なる新しいアイデアに基づき核融合反応を実現する方法の提案やそれに基づく実験の報告であり、こちらは従来の科学的知見と矛盾しない本当の核融合を志向したものであると理解出来る。核融合反応は、第3章にも詳しく述べられているような各種条件が整えば、これまでの物理的知見を否定せずとも十分起こり得るものである。特に、第5章に述べた方法は、新しい提案や実験結果である。実験結果が得られているものであっても、当然追試の結果を待つ必要がある上、また直ちにエネルギーシステムになる程の効率は得られておらず基礎実験の段階である。今回のレビューで取り上げられた全てのアイデアが実現し得るかどうかは、今後の検討を待たなければならないが、これらの研究開発、さらには新たな概念の創出を確固たる科学的根拠に基づいて、着実に推進していくことは、核融合の基礎研究上極めて重要なことである、と云うことが出来る。

このように、今回のレビューを行った結果、「常温核融合」をめぐる動きは、

- (1)核融合ではない可能性の高い「常温核融合」研究(本来、物性に関する基礎的な研究として行われるべきもの)、及び
- (2)既知の概念(磁気核融合, 慣性核融合, 等)とは異なるが本当の核融合に関する研究、との2つの流れが生じて来ているようである。

通産省が関与する新水素エネルギー・プロジェクトは前者に属しており、パラジウムの物性実験を大規模に行うことの意義は、何を期待しているかによる。もし、パラジウムを媒体とするエネルギー変換への応用を考えているのであれば固体物理学的に新たな知見が得られるかもしれない。しかし核融合反応の実現への期待を持っているのであれば、現状の実験結果を見る限り、核融合反応であると考えことは無理がある。

一方、後者の流れは従来からも重要な研究であるが、トカマクを始めとする磁気核融合研究が大規模なプロジェクトとして進んでいるが、基礎に戻ってより簡易な道具立てでの核融合を志向する研究開発も極めて重要であり、今後も注視していく必要があろう。

参考文献

- 1) 日本原子力研究所化学部編：「常温核融合のすべて」、原子力工業, 37(4), (1991), pp.10-57.
- 2) M.Fleischmann, S.Pons and M.Hawkins: J. Electroanal. Chem., 261 (1989), p.301.
- 3) S.E.Jones, et al.: Nature, 337 (1989), p.737.
- 4) 日本原子力研究所化学部等共同実験チーム: JAERI-M 89-142 (1989) 及び JAERI-M 90-134 (1990).
- 5) Ed. H.Ikegami: "Frontiers of Cold Fusion", Proc. 3rd Annual Int. Conf. on Cold Fusion, October 21-25, 1992, Nagoya, Universal Academy Press, Inc., Tokyo, Japan (1993), [ICCF-3 (1992, 名古屋) 論文集].
- 6) 新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO): 新水素エネルギーシンポジウム'94 要旨集、平成6年2月23-24日 (札幌)
- 7) (財)エネルギー総合工学研究所: 座談会「新水素エネルギー実証技術開発プロジェクトの進め方について」、季刊 エネルギー総合工学、16, (4), pp.2-24 (1994.1).
- 8) 浅見直人: 「先進的な基礎研究開発へのサポート、新水素エネルギー実証技術開発プロジェクト」、日本の科学と技術、〔冬〕、特集「常温核融合」、日本科学技術振興財団、35, No.271 (1994), p.66.
- 9) E.Yamaguchi and T.Nishioka: 文献5), p.179.
- 10) R.T.Bush and R.D.Eagleton: 文献5), p.405, p.409.
- 11) R.Notoya and M.Enyo: 文献5), p.421.
- 12) T.Ohmori and M.Enyo: 文献5), p.427.
- 13) ICCF-4 ABSTRACT (Forth Int. Conf. on Cold Fusion), Lahaina Maui (1993).
- 14) Y.Arata and Yue-Chang Zhang: 文献13), C2.3.
- 15) N.Hasegawa, N.Hayakawa, Y.Yamamoto and K.Kynimatsu: 文献13), C1.3.
- 16) M.Okamoto, Y.Yoshinaga and T.Kusunoki: 文献13), C2.4, N3.4.
- 17) M.H.Miles and B.F.Bush: 文献13), C2.9.
- 18) G.H.Miley, E.G.Batyrbekov, J.U.Patel, H.Hora, R.L.Zich and J.W.Tompkins: 文献13), C3.1.
- 19) R.Bush and R.Eagleton: 文献13), C3.6, N2.2.
- 20) H.Ramamurthy, M.Srinivasan, U.K.Mukherjee and P.A.Babn: 文献13), C3.8.
- 21) Q.F.Zhang, et al.: 文献13), C3.11.
- 22) T.Mizuno, M.Enyo, T.Akimoto and K.Azumi: 文献13), C3.7.
- 23) T.Iida, M.Fukuhara, Sunarno, H.Miyamaru and A.Takahashi: 文献13), N3.3.
- 24) J.Kasagi, T.Ohtsuki and M.Hiraga: 文献13), N3.12.
- 25) M.Teshigawara, et al.: 文献13), N4.5.
- 26) T.Ohmori and M.Enyo: 文献13), N2.3.
- 27) A.G.Lipson, et al.: 文献13), N2.5, N4.7.
- 28) H.Akita, et al.: 文献13), M1.4, M2.10, M3.3, M3.5. (M2.3, M2.8).
- 29) R.A.Huggins: 文献13), M2.2.
- 30) H.Okamoto and S.Nezu: 文献13), M2.3.
- 31) B.Y.Liaw, B.E.Liebert and Y.Ding: 文献13), M2.7.
- 32) F.Cerani, et al.: 文献13), M1.5.
- 33) J.Dash and G.Noble: 文献13), M2.1.
- 34) M.Fleischmann and S.Pons: 文献5), P.47.
- 35) B.Baranowski, S.M.Filipek, M.Szustakowski, J.Farny and W.Woryna: J. Less-Common Met., 158, 347(1990).
- 36) B.Baranowski: "Metal hydrogen system at high hydrogen pressure," in Hydrogen in Metals II, Vol.29 of Topics in Applied Physics, ed. G.Alefeld & N.Vokl, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, (1978), pp.157-200.
- 37) 坂本芳一: 「Pd中の水素(重水素)溶解挙動からのアプローチ」、文献6), P.17.
- 38) T.B.Flanagan, W.Luo and J.D.Clewley: J. Less-Common Met., 42(1991), pp.172-174.
- 39) 高橋亮人他: 「常温核融合は確証されたのかー中性子・トリチウム・熱の発生」、応用物理、62(7), (1993), pp.707-717.
- 40) 岡本眞實: 「常温核融合研究をどうとらえるか」、核データニュース、No.45(1993), pp.51-57.
- 41) 深井 有: 「常温核融合」の昨今、日本物理学会誌、48(5) (1993), pp.354-360.
- 42) E.Storms: Fusion Technol., 20 (1991), p.433.
- 43) J.Balei and J.Divisek: J. Electroanal. Chem., 278 (1989), p.85.
- 44) J.Divisek, L.Furst and J.Balei: ibid., 278(1990), p.99.
- 45) R.H.Wilson, J.W.Bray, P.G.Kosky, H.B.Vakil and F.G.Will: J. Electroanal. Chem., 332(1992), pp.1-31.
- 46) M.Fleischmann and S.Pons: J. Electroanal. Chem., 332 (1992), pp.33-53.

- 47) M.Fleischmann and S.Pons: Phys. Letters A,176(1993), pp:118-129.
- 48) A.Takahashi, A.Mega, T.Takeuchi, H.Miyamaru and T.Iida: 文献5), p.79.
- 49) M.C.H.Mckubre, S.Crouch-Baker, A.M.Riley, S.I.Smedley and F.L.Tanzella: 文献5), p.5.
- 50) E.Storms: 文献5), p.21.
- 51) E.Storms: Fusion Technol., 23 (1993), p.230.
- 52) K.Kunimatsu, N.Hasegawa, A.Kubota, N.Ishikawa, H.Akita and Y.Tsuchida: 文献5), p.31.
- 53) N.Hasegawa, K.Kunimatsu, T.Ohi and T.Terasawa: 文献5), p.377.
- 54) N.Oyama, T.Terashima, S.Kasahara, O.Hatozaki, T.Ohsaka and T.Tatsuma: 文献5), p.71.
- 55) K.Ota, M.Kuratsuka, K.Ando, Y.Iida, H.Yoshitake and N.Kamiya: 文献5), p.71.
- 56) M.H.Miles, K.H.Park and D.E.Stilwell: J. Electroanal. Chem., 296(1992), p.241.
- 57) M.H.Miles and B.F.Bush: 文献5), p.113.
- 58) 国松敬二: 「重水電解における過剰熱発生」、文献8), p.55.
- 59) 国松敬二、他: 文献5), p.385, p.505, p.573.
- 60) 池上英雄: 「最近の研究の焦点と推移」、文献8), p.10.
- 61) 火力原子力発電技術協会: 火力原子力発電, 32, (6), p.603 (1981).
- 62) 火力原子力発電技術協会: 火力原子力発電, 40, (1), p.86 (1989).
- 63) Y.Fukai: 文献5), p.265.
- 64) 坂本芳一: 「パラジウム中の水素(重水素)溶解からみた常温核融合」、文献8), p.39.
- 65) Y.Fukai and N.Okuma: Jpn. J. Appl. Phys., 32, L1256(1993).
- 66) 山口栄一: 「核生成物を追う新しい試み」、文献8), p.50.
- 67) 山口栄一、西岡孝: 「重水素化パラジウムからのヘリウム-4生成の検出」、プラズマ・核融合学会誌、69(1993), p.743.
- 68) 山口栄一、西岡孝: 「ヘリウム⁴生成と熱の発生の相関」、文献39), p.712.
- 69) 池上英雄: 「今後の研究の進め方はいかにあるべきか」、文献39), p.717.
- 70) F.Besenbacher, B.B.Nielsen, J.K.Norskov, S.M.Myers and P.Nordlander: J. Fusion Energy, 9(1990), p.257.
- 71) S.M.Myers, P.M.Richards, W.R.Wampler and F.Besenbacher: J. Nucl. Mater., 165(1989), p.9.
- 72) E.Wicke and H.Brodowsky: "Hydrogen in palladium and palladium alloys", 文献36), p.73.
- 73) T.Iida, M.Fukuhara, H.Miyazaki, Y.Sueyoshi, Sunarno, J.Datemichi and A.Takahashi: 文献5), p.201.
- 74) J.Kasagi, K.Ishii, M.Hiraga and K.Yoshida: 文献5), p.209.
- 75) 笠木治郎太: 「固体金属内での核融合反応」、文献8), p.34.
- 76) Giuliano PREPARATA, "Some theories of 'cold' nuclear fusion: A review," Fusion Technol., 20 (1991), pp.82-92.
- 77) V.A. Tsarev, "Cold fusion," Sov. Physics USP, 33(1990), pp.881-910.
- 78) 竹田辰興: 「常温核融合反応の理論」、文献1), pp.40-48.
- 79) J.Rafelski, et al.: "Theoretical limits on cold fusion in condensed matter," AZPH-TH/89-19.
- 80) 上村正康: 「分子内核融合反応率の理論」、低温核融合に関する討論会記録、JAERI-M 89-132 (1989) p.9.
- 81) I.Shimamura: Prog. Theor. Phys., 82(1989), p.304.
- 82) J.Kondo: J. Phys. Soc. Japan, 58(1989), p.1869.
- 83) M.Vasseli, et al.: Nuovo Cimento, 11(1989), p.927.
- 84) F.Parmigiani and P.G. Sona: Nuovo Cimento, 11(1989), p.913.
- 85) S.Ichimar, et al.: J. Phys. Soc. Japan, 59(1990), p.1333.
- 86) Gennady V.Fedorovich: Fusion Technol., 23(1993), p.442.
- 87) Gennady V.Fedorovich: Fusion Technol., 24(1993), p.288.
- 88) Gennady V.Fedorovich: Fusion Technol., 25(1994), p.120.
- 89) C.DeW.Van Siclen and S.E. Jones, J.Phys. G: Nucl. Phys., 12(1986), p.213.
- 90) E.E. Salpeter and H.M.Van Horn: Astrophys. J., 155(1969), p.183.
- 91) 鹿園直基: 「Pycnonuclear reaction, 低温高密度プラズマ中での核融合反応率」、文献80), p.31.
- 92) M.W. Guinann, G.F. Chapline, and R.W. Moir: "Catalysis of deuterium fusion in metal hydrides by cosmic ray muons," LLNL Report UCRL-100881(1989).
- 93) K.Nagamine, et al.: "Evidence against condensed matter fusion induced by cosmic ray muons," Workshop on Cold Fusion Phenomena, May 23-25, 1989, Santa Fe.
- 94) J.Rafelski, et al.: Fusion Technol., 18(1990), p.136.
- 95) G.L.Shaw, et al.: Nuovo Cimento, 102A(1989), p.1441.
- 96) Yu.N.Bazhutov and G.M.Uereshkov: 文献13), T2.9.
- 97) R.N.Boyd, et al.: "Optimum chemical sites and techniques for searches for negatively charged rare

- particles," *Science*, 244(1989), p.1450.
- 98) L.Turner: "Thoughts unbottled by cold fusion," *Physics Today*, 42(1989), p.140.
 - 99) L.Turner: *J. Fusion Energy*, 9(1990), p.447.
 - 100) R.T.Bush: *Fusion Technol.*, 19(1991), p.313.
 - 101) R.T.Bush: *Fusion Technol.*, 22(1992), p.301.
 - 102) M.Jaendel: *Fusion Technol.*, 21(1992), p.176.
 - 103) S.N. Vaidya: *Fusion Technol.*, 24(1993), p.112.
 - 104) Xing Xhong Li, De Zhe Jin and Lee Chang: 文献5), p.597.
 - 105) Yeong E.Kim, Jin-Hee Yoon, Alexander L.Zubarev and Mario Ravinowitz: 文献13), T2.2.
 - 106) P.L.Hagelstein: "Coherent fusion theory," 1989 Winter Annual Meeting of The American Society of Mechanical Engineers, 89-WA/TS-4.
 - 107) P.L.Hagelstein: "Status of coherent fusion theory," First Cold Fusion Conf. March 29-31, 1990, The Univ. of Utah, National Cold Fusion Institute, p.99.
 - 108) R.H.Dicke: *Phys. Rev.*, 86(1952), p.745.
 - 109) P.L.Hagelstein: 文献13), T1.1.
 - 110) P.L.Hagelstein and S.Kaushik: 文献13), T2-10.
 - 111) P.L.Hagelstein: *Fusion Technol.*, 22(1992), p.172.
 - 112) P.L.Hagelstein: *Fusion Technol.*, 23(1993), p.353.
 - 113) Lali Chatterjee: "On a weak flavor for cold fusion," *Fusion Technol.*, 20(1991), p.358.
 - 114) J.Schwinger: First Cold Fusion Conference, March 29-31, 1990, The Univ. of Utah, National Cold Fusion Institute, p.130.
 - 115) Z.Sun and D.Tomanek: *Phys. Rev. Lett.*, 63(1989), p.59.
 - 116) A.Takahashi: *J. Nucl. Sci. Technol.*, 26(1989), p.558.
 - 117) A.Takahashi: 文献13), T3.3.
 - 118) D.Das and M.K.S.Ray: *Fusion Technol.*, 24(1993), p.115.
 - 119) S.R.Chubb and T.A.Chubb: *Fusion Technol.*, 24(1993), p.403.
 - 120) S.R.Chubb and T.A.Chubb: 文献5), p.623.
 - 121) S.R.Chubb and T.A.Chubb: 文献13), T3.1.
 - 122) J.T.Waber: 文献5), p.627.
 - 123) J.T.Waber and Manuel de Llano: 文献13), T3.2.
 - 124) N.Matsunami: 文献5), p.637.
 - 125) Jiefu Yang, et al.: *Fusion Technol.*, 25(1994), p.203.
 - 126) J.C.Fischer: *Fusion Technol.*, 22(1992), p.511.
 - 127) J.C.Fischer: 文献13), T3.8.
 - 128) G.F.Cerofolini and A.F.Para: *Fusion Technol.*, 23(1993), p.98.
 - 129) J.S.Cohen and J.D.Davies: *Nature*, 338(1989), p.705.
 - 130) T.Takeda and T.Takizuka: *J. Phys. Soc. Japan*, 58(1989), p.3073.
 - 131) V.A.Klyuev, et al.: *Sov. Tech. Phys. Lett.*, 12(1986), p.551.
 - 132) J.T.Dickinson, et al.: *J. Mat. Res.*, 5 (1989), p.109.
 - 133) E.Linke and J.Wollbrandt: "Emission of high energy electrons by mechanical treatment", 4th Int. Symp. on Exoelectron Emission and Dosimetry, Liblice 1973, INIS-mf-1597(1974).
 - 134) V.A.Klyuev, et al.: *Sov. Dokl. Phys. Chem.*, 279(1984), p.1027.
 - 135) G.A.Sobolev, et al.: *Dokl. Acad. Nauk*, 276(1984), p.583.
 - 136) T.Takeda and T.Takizuka: "Fracto-fusion-mechanism of cold fusion", JAERI-M 89-093(1989).
 - 137) K.Yasui: *Fusion Technol.*, 22(1992), p.400.
 - 138) K.Yasui: 文献5), p.605.
 - 139) K. Langanke, H.J.Assenbaum, C. Rolfs, *Z. Phys. A333* (1989) p.317.
 - 140) R.W.Kuchne: *Fusion Technol.*, 25(1994), p.198.
 - 141) K.Fukushima: 文献5), p.609.
 - 142) T.V.Prevenslik: 文献13), T3.7.
 - 143) M.Gaida, D.Harley and J.Rafelski: "Conditions leading to cold fusion neutrons", Workshop on Cold Fusion Phenomena, May 23-25, 1989, Santa Fe.
 - 144) R.Seitz: *Nature*, 339, 185(1989).
 - 145) M.Cribier, M.Spiro and J.Favier: *Phys. Letters*, B228(1989), p.163.
 - 146) W.Gluebler, et al.: *Nucl. Phys.*, A242(1975), p.265.
 - 147) H.Oswald, et al.: *Nucl. Phys.*, A435(1985), p.77.
 - 148) F.Ajzenberg-Selove: *Nucl. Phys.*, A490(1988), p.1.

- 149) Xing Zhong Li: 文献13), T2.1.
- 150) J.P.Vigier: 文献13), T2.7.
- 151) R.L.Mills and W.R.Good: *Fusion Technol.*, 25(1994), p.103.
- 152) R.L.Mills and K.Kneizys: *Fusion Technol.*, 20(1991), p.65.
- 153) J.A.Maly and J.Vavra: *Fusion Technol.*, 24(1993), p.307-318.
- 154) F.J.Mayer and J.R.Reitz: *Fusion Technol.*, 20(1991), p.367-372.
- 155) R.A.Rice, Y.E.Kim and M.Rabinowitz: 文献13), T2.3.
- 156) A.J.Leggett and G.Byam: *Phys. Rev. Lett.*, 63(1989), p.191.
- 157) 深井 有: 「金属中水素の基礎物性」、文献80), p.6.
- 158) S.Anghaie, P.Froelich and H.J.Nonkhorst: *Fusion Technol.*, 17(1990), p.500.
- 159) R.J. Beuhler, G. Friedlander, L. Friedman, *Phys. Rev. Letters* 63 (1989) p.1292.
- 160) Y.K.Bae, et al.: *Phys. Rev.*, A44, R4091(1991).
- 161) R.J.Beuhler, et al.: *Phys. Rev. Lett.*, 68(1994), p.2108.
- 162) M.Fallavier, et al.: *Nucl. Instr. & Meth. B* 88(1994), p.122.
- 163) R.Vandenbosch, et al.: *ibid.*, B88(1994), p.116.
- 164) A.G.Lipson, et al.: *JETP*, 76(1993), p.1070.
- 165) B.P.Barber, et al.: *Nature*, 352(1991), p.318.
- 166) De Ninno, et al.: *Europhys. Lett.*, 9 (1989), p.221
- 167) M.C.H.Mckubre, et al.: *The science of Cold Fusion, Proceedings of ICCF-2, Como, Italian Physical Soc.*, (1991) pp.419-444.
- 168) S.A.Semiletov, et al.: *Sov. Phys. Crystallogr.*, 25(1980), p.665.
- 169) K.Fukushima and T.Yamamoto: 文献13), M2.6.
- 170) A.J. Leggett, G. Baym, *Nature* 340 (1989) p.45.
- 171) J.K. Dienes, *Fusion Technol.* 19 (1991) pp.543-546.
- 172) E. Tabet, A. Tenenbaum, *Fusion Technol.* 18 (1990) pp.143-146.
- 173) S. Ichimaru, *J. Phys. Soc. Japan* 60(1991) pp.1437-1440.
- 174) G. Zweig, "Quark catalysis of exothermal nuclear reactions", *Science* 201 (1978) p.973.
- 175) R. Cahn, *Phys. Rev. Letters* 40 (1978) p.80.
- 176) P. Freund et al., *Nature* 276 (1978) p.250.
- 177) C. Astaldi, A Bianco, S. Modesti, E. Tossatti, *Phys. Rev. Letters* 68 (1992) p.90.
- 178) M. Jandel, *Fusion Technol.* 17 (1990) pp.493-499.
- 179) L.S. Celenza, V.K. Mishra, C.M. Shakin, *Phys. Rev. Letters* 57 (1986) p.55.
- 180) F.J. Mayer, J.R. Reitz, *Fusion Technol.* 20 (1991) pp.367-372.
- 181) Wan Xiang Zhang, *Fusion Technol.* 21 (1992) pp.82-85.
- 182) A.J. Walton, *Advances in Physics* 33 (1984) pp.595-660.
- 183) J.M. Carpenter, *Nature* 338 (1989) p.711.
- 184) R.A. Rice, Y.E. Kim, M. Rabinowitz, *Fusion Technol.* 26 (1994) pp.110-111.
- 185) J.A. Maly, J. Vavra, *Fusion Technol.* 26 (1994) pp.111-112.
- 186) E.S. Rittner, A.M. Mealenberg Jr., *J. Fusion Energy* 9 (1990) pp.377-382.
- 187) L. Pauling, "Explanation of cold fusion," *Nature* 339 (1989) p.105.
- 188) A.F. AbuTaha, "Cold fusion – The heat mechanism," *J. Fusion Energy* 9 (1990) pp.345-349.
- 189) A.F. AbuTaha, "Cold fusion – Engineering perspectives," *J. Fusion Energy* 9 (1990) p.391.
- 190) R.A. Rice, G.S. Chulick, Y.E. Kim, *Fusion Technol.* 18 (1990) p.147.
- 191) P.M. Echenique, J.R. Manson, R.H. Ritchie, *Phys. Rev. Letters* 64 (1990) 1413.
- 192) O. B. Christensen, P. D. Ditlevsen, K. W. Jacobsen, P. Stoltze, O. H. Nielsen, and J. K. Nørskov, *Phys. Rev. B*, 40 (1989), p.1993.
- 193) N.Hasegawa, N. Hayakawa, Y. Tsuchida, Y. Yamamoto, and K. Kunitatsu, *Fusion Technol.* Accepted for Publication
- 194) S.M. Myers, P.M. Richards, D.M. Follstaedt, and J.E. Schirber, *Phys. Rev. B* 43 (1991) p.9503.
- 195) 科学技術庁原子力安全局監修「原子力規制関係法令集95年版」大成出版社、p.1107の表5「自由空間中の粒子フルエンスが1平方センチメートル当たり1兆個である場合の線量当量」、(1994)

付録 ICCF-3及びICCF-4の研究報告リスト

第3回常温核融合国際会議 (ICCF3)

まとめ-1 核反応生成物検出 (nuclear products)(24PI-I - 39, 24P II-I - 9)

重水電解法

番号	陰極	陽極	電流(mA/cm ²)	発表者	所 属	検 出 粒 子
24PI -2	Pd		(20-40) (80-240)	岡本 他	東工大	n: 4回/8回バースト、 強度は弱い、再現性悪い
-4	Pd		200	Miles 他	NAWC (米)	T: 346→690dpm, 334→508dpm 過剰熱 0.15W(2回/33回)
-11	Pd			Bockris 他	Texas A&M (米)	T: massive production, ³ He=0, ⁴ He=(2-100)xBG(9本/10本)
-13	Pd			Sevilla 他	Univ. Aut. (スペイン)	T: BGを越える量
-14	Pd	Pt		Dalidovich 他	Inst. Chem Phys(ロシア)	n: 2x10 ³ /s(効率10 ⁻⁴) T: 2x10 ¹⁸ atoms/sec(H ₂ O系では低い)
-16	Pd			Alessio 他	フラスカチ (イタリア)	n: 天然レベル T: 60-100%過剰(再結合水中)
-30	Pd	Pt		Choi 他	大阪大	n: ⁵⁶ Fe 放射化847keV γ線 検出法でBG以上の検出認めず
-31	Pd-Pt		交番電解 0-22 2hr	藤原 他	Electrotech- nical Lab. (筑波)	n: 0.8-3.2c/hr (0.8-3.0fusions/d-pair/sec) 再現性未確認
-33	Pd	Pt	パルス磁場 7テスラまで	Liang 他	Southwestern Inst. Phys. (中国)	n放出への磁場効果無
-34	Pd		0.1M LiOD	Yuan 他	Tsing Hua Univ.(台湾)	n: BGより20-30%高い, no γ
-35	Pd	Pt		Suhe 他	SINPC(中国)	n: 10 ² -10 ³ /s, T検出, x-線フィルム 黒化、再現性100%
-37	Pd(25μm)		0.1M LiOD 100	宮本 他	都立大学	p: BG以下(1.29-1.52x10 ⁻²⁴ fusion/s 以下)
-38	Ti			Zhang 他	CUST(中国)	⁴ He: 重水レベル以下の部分のみで検 出(SIMS), 過剰熱発生
24P II-2				谷口 他	大阪府立大	charged particle: 4°C6hr電解後数 十°Cに上昇する過程で発生(バース ト、パルス幅10-100nsec)

その他の電解法

24PI -20	重水素化アルコール 陰極 Pd			中原 他	都立大	n: 22/2hr, 27/3hr BG=4/hr
-26	重水素化硫酸-重水			松本 他	青学大	n: fission track法、軽水系の1.7倍 T: 10 ⁴ atoms/ml/s(溶液), 10 ⁴ atoms/ cm ² /s(Pd内), T/nは10 ⁴ のオーダー
-34	LiCl-KCl, LiD			Yuan 他	Tsing Hua Univ.(台湾)	n: BGの2倍(350keV以下が主)
24P II- 10	ガス相固相電解 (-)D ₂ (1atm)Pd BaCeO ₃ PdD ₂ (1atm)(+), 600-800°C			Jorne 他	Univ. Roch. (米)	n: 時々バースト発生

加速イオン法

24PI -5	150keV D→TiDx	吉原 他	東北大	p検出
-8	350-1000eV H,D→Ti,Pd他 0.5, 15mA/cm ²	Hubler 他	NRL (米)	p検出
-12	150keV D→TiDx	吉原 他	東北大	³ He:3回/50回、D/Ti>1.3の時
-27	(99.8%D ₂ +0.2%H ₂)及び (50%D ₂ +50%H ₂)のプラズマ →Ti, Pd	Duan 他	SIP (中国)	n:10 ⁴ /burst(10 ⁷ /sec) ((99.8%D ₂ +0.2%H ₂)の時)
-39	250keV D→Pd(後面Ag膜)	高橋 他	大阪大	p:3-5MeV(D-Dでは3MeV)
24PI -17	Am-Be→n →PdD	Corradi 他	フラスカチ 他 (イタリア)	n:6+-1%過剰 (ブランク差引後) 0.1-0.40keV

熱サイクル法

24PI -23	0飽和 (電解法、ガス法) Pd, NB(Nb?), LaNi ₅ , steel	Golubnichy 他	LM-BI 他 (ロシア)	n, 音波、電磁波
-28	冷却-昇温 Ti/D, Ti/H, Pd/D, Pd/H Ti:20g, Pd:50g	Botta 他	DdFSdP 他 (イタリア)	n:0.11+-0.03/g/s(Ti/D)(H系との差) 0.02+-0.01/g/d(Pd/D)(H系との差)
24P II-1	LaNi ₅ 52.5g/D ₂ 77-300K D ₂ :7.9x10 ⁵ Pa	坂口 他	大阪大 岡山大	³ He:(2.74+-0.83)x10 ⁶ atoms ⁴ He:(4.09+-0.64)x10 ¹¹ atoms H ₂ では発生無、空気漏れ無 charged particle:D/Pd>0.85が異 データ無
-4	Pd/D in high pressure vessel	Da-Wei Mo 他	Tsinghua	常効果のしきい値、
-11	冷却-昇温, AC on or off Ti, Ti合金・化合物、Pd, Agに Dをイオン注入 (冷却-昇温法?)	Chambers 他	Naval Res. Lab. (米) Univ. IHEP (中国)	

放電・高圧印加法

24PI -15	グロー放電 D ₂ 中、Pd, Nb, Zr 他	Karabut 他	LA(ロシア)	特性x線 (5-20keV), off後も1hr継続
-32	直流高電圧印加 (Pd, Ni, W-D ₂)	山田 他	岩手大	n:61c/10sec (最高) (BG 8.6c/h) Pd電極時のみ
-33	交流放電、Pd-D ₂ (10-数10 Torr), 500V, 50Hz	Liang 他	Southwestern Inst. Phys. (中国)	n:BGの4倍、再充填後10倍
-36	交流放電、Pd-D ₂ (4-13Pa) 7-11kV, 50Hz	Huqing 他	ISMT, IAPCM (中国)	n:13-330/s(1-100分間に亘り) (2-2.5MeV)/(2.5-7MeV)=1/9 100%再現性
24P II-3	高圧放電、Pd-D, D _x Y ₁ Ba ₂ Cu ₃ O _{7-δ}	Shangrian 他	GSAS (中国)	charged particle:D _x Y ₁ Ba ₂ Cu ₃ O _{7-δ} からは繰り返しBGの百倍以上発生
-5	グロー放電、Mo-Ti, Mo-Pd電極 600-1200V, 2-20mA, 2-100Torr	Liu 他	CSM(米)	charged particle
-6	グロー放電、D/Pt, Nb, W, Cu Mo, Ag, or Fe	Heqing 他	IAPCM(中国)	n:0.5-11MeV連続スペクトル、平均 エネルギー3.55MeV, (0.5-1.0)(3.0- 3.5)(5.0-5.5)(8.0-8.5)(9.0-9.5) にピーク有、2.45MeVは谷
-7	グロー放電、実験条件はref.1	Karabut 他	LA, MPEI (ロシア)	⁴ He検出

衝撃粉碎法

24PI -6	衝撃破壊法(impact destruction), LiD, TiDx, $Al_2(SO_4)_3 \cdot K_2SO_4 \cdot 24D_2O$	Golubnichy 他	LM-BI (ロシア)	n検出?
-19	粉碎法 Lithium niobate Lithium Niobate + LiD D_2 ガス中	中原 他	都立大	n:64/1.6%/12hr=4000/12hr
24P II-8	ボールミル粉碎法、 $TiD_{1.0}, TiD_{1.3}, TiD_{1.9}, YD_{2.9},$ $Ti_{0.9}Al_{0.1}V_{0.04}D_{1.1}$ $YBa_2Cu_3O_{7-x}D_{0.8}$	渡辺 他	中央大 東北大	n:no positive signature

その他

24PI -22	相変化に伴う放出 $Al_2(SO_4)_3 \cdot K_2SO_4 \cdot 24D_2O$ $KNaC_4H_4O_6 \cdot 4D_2O$	Golubnichy 他	LM-BI 他 (ロシア)	n, 音波、電磁波検出?
-25	水和に伴う放出、 LiD in D_2O and in H_2O	Golubnichy 他	LM-BI 他 (ロシア)	n, 音波、電磁波検出?
-29	Pd in D_2 (soak)	和田 他	名古屋大	残留ガス中に質量3, 6が増加
24PI -3	外法拡散制御法 酸化物-Pd-Au	山口 他	NTT	p(最大3MeV), 4He , 過剰発熱
-9	湿式?	Morrison	CERN (伊)	no evidence
-10	高電流パルス Si-PdDのスタック	Menlove 他	LANL(米)	T:0.02-0.2nCi/hr
24P II-9	H/Pd, D/PdをX線フィルムに曝す	Rout 他	バーバ研 (インド)	e:300-400keV(tentative conclusion)

まとめ-2 過剰熱発生

番号	陰 極	陽極	電解液	電流密度	発表者	所 属	発熱量	備 考
24P II-1	Pd(99.99 %25x25x1	Pt線 7巻			高橋 他	大阪大	平均30W 100W2回	12時間周期L-H D/Pd=0.95,再現性 悪い
-13	Pd		0.3MLiOD		Celani 他	INFN Lab. (イタリア)	10%程度	コジムの問題
-14	Pd				Fleishman 他	Univ. South- hampton (英)	1kW/cm ² 以上	沸点領域で電解
-17	Pd 1.67φx 80x0.5	Pt線			Xinwei 他	ISNPC (中国)	約10 ⁴ J [*]	3回のexplosion *3回目4℃上昇
-18	Pd(7ニ-ル) 3φ	Pt		0.1-1.2 A/cm ²	Wan 他	National Tsing Hua Uni.(台湾)	電解槽 1-2.5℃ 上昇ハ- スト	電解槽400ml,7週 間電解
-19	Pd 4φx18.5		1M LiOD		長谷川 他	IMRA JAPAN AISIN(日本)	最大35%	LiOH/H ₂ O系発生無 D/Pd=0.83-0.89 10,30℃,8週間以 上電解、
-20	Pd 25x25x1			鋸歯の後 L-Hモード	小林 他	IMRA JAPAN (日本)	?	
-21	Pd	Pd			Bertalot 他	フランス (イタリア)	有	高橋と同じ熱量計 ⁴ He検出(1991年) 20分パルス
-22	Pd			30-300 mA/cm ² パルス	高橋 他	大阪大	2-3W	
-24	Pd	Pt		40mA	田中	Tokushima Res. Centre	?	一部磁場下
-25	Pd	Pt			Zhang 他	ICAS(中国)	?	
-26	Pd on Pd or on Ni ガラスマ スレベル法				荒田 他	大阪大	*	*電解後の電極を 空気中に取り出し たとき20kJ発生
-29	Pd	Pd, Pt	LiOD		Wan 他	National Tsing Hua Uni.(台湾)	85.5→ 101.4℃	25,80℃で電解 表面silicate膜
-30	Pd及び 10%Ag-Pd		0.1 or 1 M LiOD	200-1000 mA/cm ²	太田 他	横浜国大	5-9%	機械処理電極のみ 発熱、電解1月後 から発熱、
-31	Pd 各種前処 理	Pt	0.1MLiOD	1050 mA/cm ² 以 下	Isagawa 他	KEK(日本)	*	*過剰熱らしきも のを観察、T無
-32			M ₂ CO ₃ , M ₂ OH, RbO (M=Na, K)		Bush 他	米	有	
-33	Pd, Ag-Pd				Bush 他	米	有	
-34			熔融塩		Liaw 他	Univ. Hawaii (米)	有	再現性悪

-35	多孔性Ni		軽水系 0.5M K ₂ CO ₃		Notoya 他	北大	入力に比例	$^1\text{H}+^{39}\text{K} \rightarrow ^{40}\text{Ca} + 8.33\text{MeV}$
-36	Ni, Au, Ag Sn		軽水系 0.5M M ₂ CO ₃ M=Na, K	1A	大森 他	北大	32-907mW (7-20%)	K ₂ CO ₃ 溶液で発熱 Au-Na ₂ CO ₃ , Au-Na ₂ CO ₃ でも同様
22P II	Pd				McKubre 他	SRI international(米)	有	β 相、D/Pd>0.9
-25	Pd				Storms	LANL (米)	7.5W (20%)	高橋型Pdシート F&P型セル
-26	Pd				国松 他	IMRA JAPAN	10-35%	D/Pd $\geq$ 0.85で発熱 D ₂ 加圧セル、実験 回数50回
-27	Pd		1M LiOD					T:46-3389Bq/ml 過剰熱とT発生相 関無
-28	円筒及び 多孔性Ni	Pt	M ₂ CO ₃ (M=K, Na, Li)軽水 系	1-2 mA/cm ²	Srinivasan 他	ハ'-ハ'研 (インド)	約70%	
-29	Pd, 99.9% 以上 2φx5	Pt	0.1M LiOD in D ₂ O 0.1M LiOH in H ₂ O		小山 他	東京農工大	3-4% (平均2.4 2%=12.1kJ)	重水系のみ発熱 12後から発熱開始

1994年1月11日

第4回常温核融合国際会議

— I C C F - 4 予稿集の概要 —

燃料研究部

1. はじめに

I C C F - 4 が 1993 年 12 月 6 日～9 日にハワイで開催された。今回の発表内容を把握するために予稿集から調査した結果をまとめた。予稿集の構成、発表件数、頁数、専門分野を下記の表に示す。

予稿集の構成、件数及び専門分野

Session	No.	日 時	件数	頁数	専門分野
Plenary	C1.1～C1.5	Mon, AM	5	50	Calorimetry
Parallel I	C2.1～C2.12	PM	12		
Parallel II	C3.1～C3.12	Tues, PM	12		
Poster	C4.1～C4.8		8		
Plenary	N1.1～N1.6	Tues, AM	6	64	Nuclear
Parallel I	N2.1～N2.12	Mon, PM	12		
Parallel II	N3.1～N3.12	Tues, PM	12		
Poster	N4.1～N4.13		13		
Plenary	T1.1～T1.5	Wedn, AM	5	81	Theory
Parallel I	T2.1～T2.12	Mon, PM	12		
Parallel II	T3.1～T3.12	Tues, PM	12		
Poster	T4.1～T4.16		16		
Plenary	M1.1～M1.5	Thur, AM	5	45	Materials
Parallel I	M2.1～M2.12	Wedn, PM	12		
Poster	M3.1～M3.5		5		
Panel Disc	D1.1～D1.7	Thur, PM	7	13	Discussion

別表

1. Calorimetry

(1) 重水電解法 (Pd/D₂O-LiOD 系)

番号	実験方法・条件	実験結果		発表者	所属(国)
		データ a)	(報告内容)		
C1. 1		X	過剰熱発生的前提条件、推測を列挙: 耐高応力材料、高温、高D/Pd	M.Fleischmann, S.Pons 他2	IMRA Europe (仏)
C1. 2	Au/Pd/Pt電極 Au は芯、Ptは表面	X	Massで ⁴ He を測定、T, n も測定 PdへD を充填するための工夫	D.Gozzi 他6	Univ. la Sapienza (伊)
C1. 3	密閉系、種々のPd、 THU で処理したPd、 Pd-Rh (D/Pd>0.9)	○	D/Pdと過剰熱の関係、再現性検討 200mA/cm ² , D/Pd>0.84で過剰熱発生 (田中貴金属Pdでは発生無し) 1M LiOH/H ₂ O では過剰熱発生無し	N.Hasegawa 他4	IMRA Japan (日)
C1. 4	高橋法(Low/High) 20-100mWのRadio Frequency + 直流	○	約17% の過剰熱発生、Pd過電圧: 350mV/950mV (Low/High 電流) 約24% の過剰熱発生 SEM 等で電極表面を観察	J.O'M.Bockris 他3	Texas A & M Univ. (米)
C1. 5	Mass flow 及びHeat flow カリメトリ	X	D/Pd系におけるカリメトリ 装置 過剰熱と生成核種(n, γ, x, ³ He ⁴ He 等) の同時測定	M.C.H.McKubre 他9	SRI Int. EPRI (米)
C2. 1		X	既に過剰熱発生データを得ている ので装置を更新し実験中	L.Bertalot 他5	ENEA Frascati (伊)
C2. 2	密閉系 開放系	X	電解法による核生成物の探索 (He, T, nのオンライン 測定) 過剰熱とn 発生との相関性	H.Miyamaru A.Takahashi 他2	阪大工 (日)
C2. 3	密閉系 二重構造カード	○	新型のDS-cathode(Pd/Pd) を用い て、長期間100%以上の過剰熱発生	Y.Arata Y.C.Zhang	阪大 (日)
C2. 4	高橋法 比較実験はH ₂ O	○ + n	3回の実験で全てn 発生、過剰熱 は1 回発生したかn との相関性は 無し、過電圧の増加が過剰熱発生 に重要な役割	M.Okamoto 他2	東工大 (日)
C2. 5	Heはガスクロマトで測定	○+ He T	過剰熱発生に伴うHe, T 濃度の測 定結果から、両者のデータ 不一致 過剰熱に対しHeは4x10 ⁻³ , Tは10 ⁻⁹	T.Aoki 他2	筑波大 (日)
C2. 6		X	過剰熱発生条件の検討 D/PdはPd表面の化学条件に依存、 D/Pdを高める因子は種々有りその 制御が困難なため再現性低い	E.Storms	Los Alamos National Lab (米)

a) 予稿集にデータ記載無し: ×

過剰熱発生を報告: ○ (+ 生成核種の測定)

番号	実験方法・条件	実験結果		発表者	所属(国)
		データ ^{a)}	(報告内容)		
C2. 7	flow 加リメトリ Pd, 90%Pd-10%Ag	○	D ₂ O 系で16回, H ₂ O 系で4 回実験 過剰熱発生は前者で機械的に処理 したPdを用いた 3回のみ: 平均6.6%, 最大13% Pd中の水素と過電圧, Li との関連	K.Ota 他7	横浜国大 (日)
C2. 8	PdO/Pd/PdO Au/Pd/PdO H ₂ O-KOH, D ₂ O-NaOD	○ + n	ペロ構造のカソード電極を用い, 電解により過剰熱発生, 再現性高 く150-200 回の熱バースト, 電解停止後40分以内にパルス 的な熱 発生(3-10 秒) を観測, 本結果は非核反応性によるもの	A.G.Lipson 他2	Russian Aca- demy of Sci. (露)
C2. 9		○ + ⁴ He	Pd/D ₂ O電解セルで生成した ⁴ He の 測定に挑戦, 検出限界は10 ¹³ ⁴ He /500ml,	M.H.Miles B.F.Bush	Naval Air War- fare Center Weapons Divis- ion (米)
C2.10	密閉系	○	twin cell を加リメータにセットして 過剰熱を測定, 50-150h の非定常 領域で最大3%の発熱及び吸熱挙動 を観測	N.Oyama	東京農工大 (日)
C2.12	電解でセル内の重水 (軽水)を沸騰蒸発	○	"Heat after death": 重水溶液が 殆ど蒸発し, 電流が零になっても 100°C近くの高温観測	S.Pons M.Fleischmann	IMRA Europe (仏)
C3. 4	Calvet型マイクロカリメータ 1mW-30mW で検量線 0.5-6mA/cm ²	○	二種類の過剰熱を観測: ・excess heat; 入力の数倍 ・anomalous heat; バースト型で 電解電圧減少時に観測され, 入 力の10% 程度	Z.Zhang 他4	Institute of Chem., Acade- mia Sinica (中)
C4. 8	電解セルの改良		過剰熱が核反応に起因するものか どうか確認するため, n とγ測定 nは既に観測	S.Isagawa 他2	高エネ研 (日)

a) 予稿集にデータ記載無し: ×

過剰熱発生を報告: ○ (+ 生成核種の測定)

(2) その他の電解法

番号	実験方法・条件	実験結果		発表者	所属(国)
		データ ^{a)}	(報告内容)		
C3. 1	多層薄膜電極: 25x25x3mm のステンレス板にTiとPdを交互に蒸着(100 Å) 後、表面にCrを60 Å被覆	○	フェルミエネルギー差の大きな金属を選択し多層薄膜電極を作製, 2kW/cm ³ のエネルギー生成, 長時間電解で薄膜がフランク状になることが問題	G.H.Miley 他5	Univ. of Illinois (米)
C3. 6	Ni(メッシュ)カソード K ₂ CO ₃ , Na ₂ CO ₃ H ₂ O	○	"Cold Alkali-Hydrogen Fusion" 軽水を用いた電解で過剰熱発生, (重水のコンタミではない) K ₂ CO ₃ よりNa ₂ CO ₃ 電解液でより大きな過剰熱発生 K→Caに変換	R.Bush R.Eagleton	Calif. State Polytech. Univ FEAT
C3. 8	開放系 Niカソード K ₂ CO ₃ , Na ₂ CO ₃ Li ₂ CO ₃ (天然, ⁶ Li) H ₂ O	○ + T	"Cold Alkali-Hydrogen Fusion" 軽水を用いた28回の電解で過剰熱発生は14回 : 0.2-0.7W 熱電対のシースにステンレス鋼を用いると過剰熱発生しない	H.Ramamurthy 他3	Bhabha Atomic Research Center (印)
C3.11	Ti D ₂ O-H ₂ O D ₂ O	○	D ₂ O-H ₂ O 混合系: 過剰熱発生無し D ₂ O 電解液では過剰熱発生有り	Q.F.Zhang 他7	Chengdu Univ. of Sci. & Tech. (中)
C3.12	10%Ag-Pd, 5%Re-Pd, 10%Mg-Ni, 15%La-Ni, 5%V/Sn-Ti	X	電解セルを用いて, 過剰熱発生を成功させるための因子の検討. (充填は60mA/cm ² 以下)	D.Cravens	Vernon, Texas (米)
C4. 3	Niカソード (9cm ²) Cs ₂ CO ₃ - D ₂ O, H ₂ O	○	過剰熱定常的に観測: 20-30% 今後Cs以外にLi, K, Rb を試験	Y.N.Bazhutov 他1	"Erzion" Center (露)
C4. 4	350 °C, 250atm 入力1kW	X	高温高压電解実験装置の紹介 冷却剤: CF ₃ CH ₂ OH-H ₂ O	H.E.Ransford 他1	Nova Resources G. (米)
C4. 7	電解セル	X	100 °C以上, 1atm以上で電解できるセルの製作	D.W.Mo 他3	NET Tsinghua Univ. (中)

a) 予稿集にデータ記載無し: X

過剰熱発生を報告: ○ (+ 生成核種の測定)

(3) その他 (実験装置、データ解析法等)

番号	実験方法・条件	実験結果		発表者	所属 (国)
		データ ^{a)}	(報告内容)		
C2.11	電解セル	X	過剰熱測定時の誤差発生要因及びその補正	P.H.Handel	Univ. of Missouri (米)
C3. 2		X	"Back to the Futre"	M.E.Melich W.N.Hansen	Naval Postgraduate school, Utah State Univ. (米)
C3. 3		X	Pd/D加リメトリー の疑問点 Q#1:F&Pのような大量の熱発生あり得るのか? Q#2: 上の疑問に答られる熱測定データが存在するのか?	"	
C3. 5		X	過剰熱生成に関する式を提案: $J/V=K'[(D/Pd)(\exp(-Q/RT))(\mu)]$ カソード温度の制御重要	J.L.Waisman N.J.Kertamus	Southern Calif. Edison (米)
C3. 7	SrCeO ₃ 型パルソ伝導体 試料を真空容器にセット, 加熱後通電しながらD ₂ ガスを注入	○	試料: SrCe _{0.9} Y _{0.08} Nb _{0.02} O _{2.97} 過剰熱発生量: 約3.6MJ (20hにわたって50-100W/cm ²) 出力/入力 = 7×10 ⁴	T.Mizuno 他 ³	北大 (日)
C3. 9	Pd箔-D ₂ O	○	Cavitation Induced Micro-Fusion + ⁴ He 過剰熱: 90W/ 3日	R.Stringham	E-Quest Sciences
C3.10		X	過剰熱測定データ解析法の提案	M.R.Swartz	JET Technology (米)
C4. 1		X	MIT Plasma Fusion Center(PFC) 過剰熱測定データの解析例	M.R.Swartz	JET Technology (米)
C4. 2	RF加熱, 永久磁石 Pd-D		10-300mWのRFエネルギーでは吸熱 200,800 ガウス下で温度上昇	D.Letts	C/O Energy Res. Group LC (米)
C4. 5	密閉系		精密カロリメータの紹介: 独立した2 系統で熱の流れを測定	S.C.Barrowes 他 ¹	Univ. of Utah (米)
C4. 6		X	安価な装置でP&F 効果を再現できると述べている(10-30% 過剰熱)	M.Hugo	Northern States Power (米)

a) 予稿集にデータ記載無し: ×
過剰熱発生を報告: ○ (+ 生成核種の測定)

2. Nuclear

重水電解法

番号	実験条件	発表者	所属	実験結果
N1.3	記述無し	D.Gozzi 他10	Univ. La Sapienza, Istituto Superiore di Sanita (イタリア)	ガス相 ^4He の single focusing magnetic mass spectrometer による分析、250回の実験中で数回BG以上の量検出、空気のコントミネーションのマーカとしてNeを利用
N1.5	Pd線カソード、 $\text{D}_2\text{O}-\text{D}_2\text{SO}_4$ 密閉系	F.G.Will 他2	ユタ大 (米) Technical Univ. Lodz (ポーランド)	BGの50倍のT (4回中4回、再現性良 H_2SO_4 では発生無)、 $\text{D, H/Pd}=1\pm 0.05$ 、平均T生成速度 $5\times 10^4 - 2\times 10^5 \text{ atom s/s/cm}^2$ 、 10^{-7} W オータ、他のPd or Pd-Li合金ではT無、電極中のT: $1.4\times 10^{10} - 4.4\times 10^{10} \text{ atoms/g-Pd}$ (BG $5\times 10^8 \text{ atoms/g}$ (maximum)、中心部が周辺部より多い、 $\text{H}_2\text{SO}_4/\text{H}_2\text{O}$ では検出限界以下
N2.1	多孔質Niカソード、 $\text{H}_2\text{O}-\text{K}_2\text{CO}_3$ 及び $\text{D}_2\text{O}-\text{K}_2\text{CO}_3$ 系、20-30ml, 6-100時間、	R.Notoya	北大触媒研	6時間以上の電解でT濃度は一定、 $\text{T}(\text{D}_2\text{O電解液})/\text{T}(\text{H}_2\text{O電解液})$ は約100, T量とD濃度は無関係、最大Tは $394\text{Bq}/20\text{ml}$ in 99.8%D soln, $9\text{Bq}/20\text{ml}$ in H soln, TはCaよりずっと少ない。
N2.2	Niメッシュカソード、 $\text{H}_2\text{O}-\text{Rb}_2\text{CO}_3$ 系、Rbから生成するSrのSIMS、イオン交換検出、	R.Bush 他1	California State Polytechnic Univ	Rb $\rightarrow$ Sr生成、試料の汚染ではない。Cold Alkali Fusion の強い証拠。
N2.3	Au-Ptメッシュを電極、 $\text{H}_2\text{O}-\text{K}_2\text{CO}_3$ 、 $\text{H}_2\text{O}-\text{Na}_2\text{SO}_4$ 及び $\text{D}_2\text{O}-\text{Na}_2\text{SO}_4$ 系、1Aで7日間電解、AESで電極表面 fusion products の観察、	T.Ohmori 他1	北大触媒研	Fe の生成を認めた。生成反応は不明。
N2.4	Niカソード、Pt線アノード、 $\text{H}_2\text{O}-\text{Li}_2\text{CO}_3$ 及び $\text{D}_2\text{O}(25\%)-\text{Li}_2\text{CO}_3$ 系、	T.K.Sankaranarayanan 他3	Bhabha 原子力研究所 (インド)	BGレベルの数倍のTを検出。 3.5Bq/ml - BGレベルの周期的な発生、汚染は無い。
N3.4	Pdカソード、 $\text{H}_2\text{O}-\text{LiOH}$ 及び $\text{D}_2\text{O}-\text{LiOD}$ 系 電解後のPd電極中のSi, Al, NaのプロファイルをSIMSで観察、	M.Okamoto 他2	東工大	n及びn+excess heatの電極内の分布はirregular(現象の発生の無い電極では単調に減少)。3 μm までの表面のDとLi濃度は減少の発生の多い方が大きい。結論として現象の発生のためにはPd表面へのDの異常な蓄積が必要、その蓄積はPd, Si, AlとLiのintermetallic compoundの形成が関与している。

重水電解法 (続き)

N3.9	Pdカソード、 D ₂ O-系、 荷電粒子をSi-SSDで測定、	R.Taniguchi	大阪大	4-10MeV領域に説明のつかないピーク。通常のPd中でのd-d fusionでは説明出来ない。
N3.10	Pdカソード (0.1mm線)、 中性子測定、140-320mA/cm ² ,	S.Sakamoto	東海大学	結果は記述無し。
N4.13	Tiカソード、 電流停止状態からの中性子発生 の減衰を測定、	M.Alguero他3	Univ. Autonoma (スペイン)	1989年に行った実験時の中性子減衰 曲線とその説明。

加速イオン法

N3.3	243keV D 3nsec→Ti(3,5,8μm) 3mmアパチャー ターゲットの後ろにSi-SSD	高橋 他4	大阪大	7,3MeV付近に異様なピークを観察 それぞれHe, Pに相当?3体融合モデルとの関係を議論する。
N3.12	150KeV D ⁺ → TiD _x (x~1.3)	J.Kasagi他3	東北大	プロトン: 12.5-16.5MeV (瘤状) 14.1Me (鋭いピーク) 17MeV (連続) ヘリウム: ~6.5MeVまで連続 D+D+D=p+n+ ⁴ He(Q=21.62MeV)を示唆
N4.4	120keV Xe → Cu, Be, In	Yu.N.Bazhutov 他5	Erzinセンタ ー	γ線を検出、ターゲット物質のβ壊 変を測定。
N4.5	90MeV I → TiD _x (x=1.9) TiHy	M.Teshigawara 他6	東北大 原研	TiD _x (x=1.9)のみ中性子を検出。
N4.10	5keV H → Ti, Pd, 荷電粒子検出器(CR-39), Al板利用エネルギースペクトル の観察、	A.R.Chindarkar 他5	RSSD (インド)	0.9MeVまでの荷電粒子、再現性良、 背面をAuで被覆試料では0.7MeV以上
N4.12	文献考察	Y.Kucherov他2	ロシア 米	Pd-D系における核反応熱放出と生成 物の考察 (文献間での結果の相違点 等)。

熱サイクル法

N2.5	YBa ₂ Cu ₃ O _{7-δ} (δは約0.1) 100AのPdでスパッタコート 電解でD導入 76-300K, 非超伝導体との比較	A.Lipson他2	物理化学研究 所 (ロシア)	超伝導体のみn (BGの3-4倍) 及び T検出
N3.2	Auコート重水素化Pdの加熱 Pd板25x25x1mm, D/Pd~0.66後77 Kに数時間維持し室温でAuコー トご真空容器内で加熱。300- 550K	Y.Iwamura他2	三菱重工	400Kでn放出、4.0x10 ² n/sec, 3.0x10 ⁻²⁸ event/s/d-d pair
N4.3	La _{0.65} Ce _{0.35} Ni _{4.6} Cu _{0.4} 粉末、 H ₂ , D ₂ , (10Pa)中77-300K、	Yu.N.Bazhutov 他3	Erzinセンタ ー (ロシア)	n, γ線、Tを検出、 thermocycling によるErzin model 核変換。

熱サイクル法 (続き)

N4.7	KD ₂ PO ₄ 単結晶 KH ₂ PO ₄ 単結晶	A.G.Lipson 他4	物理化学研究 所 (ロシア)	KD ₂ PO ₄ 単結晶 でのみキュリー点 (221±1K)でn及びT(2.5x10 ⁸ 原子/サイ クル)発生、 n/T~7。
------	--	------------------	----------------------	---

放電・高圧印加法

N1.2	D ₂ :1-20Torr, 10-100mA, 100-500 V, 電極Pd他 (1cm ² , 0.1mm厚) 低・高速中性子スペクトロメー タ、γ線スペクトロメータ、 荷電粒子検出器、x線フィルム activation foil, track detec tor, カロリメータ	Y. Kuchеров他2	ロシア 米国	500回の実験。最大過剰熱30W(D ₂ の 化学反応の10倍、電気入力5倍) 過剰熱は78回中50%で発生 (n, γ線 発生との相関は無)、10 ⁷ n/sまでの 中性子放出 (銀箔放射化)、nエネ ルギー17MeVまで、γ線よりわず かなRI(Rh, Sr)検出、大部分のエネ ルギーは300keVより低い。x線フィ ルムにビーム状スポット100-200keV .Pdの特性x線 (Ge-Li)観察される ことあり。
N1.6	ozonizer型、Pd or ステンレス スチール電極	J. Dufour他2	フランス	過剰エネルギー100% $^1\text{H} + ^1\text{H} + e \rightarrow ^2\text{H} + \text{neutrino}$ ① $^1\text{H} + ^2\text{H} + e \rightarrow ^3\text{H} + \text{neutrino}$ ② ①, ② からのby-productの検出法と 予備試験結果を示す
N2.9	D ₂ 中グロー放電、6.6kV, 4mA 25-5パスカル。 nスペクトルの測定。NE-213及 びbubble damage polymer detector	Hui Quan Qi他6	Tsinghua 大 学 (中国)	2.5MeV付近にn(1CCF-3の結果と異な る、1CCF-3では3-10MeV成分多い)
N2. 11	10kVパルス放電	Jiangtang HE	Inst. High Energ. Phys. (中国)	n発生なし、425, 870keVにγ線、 高エネルギー荷電粒子で励起された ¹⁰⁸ Pd*, ⁵⁶ Fe*の脱励起による
N3.5	グロー放電	V. A. Romodanov	ロシア	結果の記述は無い
N3.7	Pd電極、D ₂ 中、 放電処理前後の電極表面の不純 物を測定。	I. Savvatimova 他2	ロシア 米国	Na, S, In, Ag, Zr, Nb, Sn, K, Cl, Br, Se, N i, Mg, Zn, Ge, Sr等放電後10 ⁴ 倍に増加 同位体比測定から核分裂反応を示唆
N3.8	PdD _x にパルス電流を印可、 中性子測定、	S. F. Taylor S. E. Johns	LANL (米国)	記述なし (地下実験施設)
N4.8	凝縮相での核反応に適したター ゲット物質の選定について	V. A. Romodanov 他3	S. R. I. (ロシア)	重い物質が適している。
N4. 11	D ₂ (<100Pa)-Pt, Nb, Ta, WThx他 2.7-18keV, 50Hz, 中性子、x線測定	L. H. Qin他12	I. S. M. T. (中国)	2.45MeV中性子検出 (他のエネルギ ーのnは検出されず)、Pd-D系では x線(<20keV)発生、中性子発生の (実験値/理論値)は WThx-Dで>8 (4.7kV) Ta-Dで>46 (4.1kV) Nb-Dで>170 (2.7kV) n発生は安定、再現性良、制御可

その他

N1.4	gas loading and electrical stimulation	D.G.Tuggle 他2	LANL (米国)	T>5nCi/h,これまでの実験よりはるかに多い。T生成に内表面の不純物関与。400ppm以上の不純物含有試料ではT発生はない。
N2.6	YBa ₂ Cu ₃ O _{7-δ} に常温でDを吸蔵させDxYBa ₂ Cu ₃ O _{7-δ} (吸蔵平衡でx=0.2)、1atomD ₂ 下、1-2days CR-39で荷電粒子検出	JIN Shang-xian 他2	Univ. Sci. Technol. China, (中国)	トラック密度(BG差引後):約 3x 10 ⁵ /cm ² 。 エネルギーの異なる種々の粒子の発生(²⁴¹ Amのα線トラックとの比較から)。Dを含まない試料からは異様な現象は観察されない。
N2.7	ペロブスカイト構造固体プロトン導電体(Dを吸蔵した)。電気化学的にDを吸蔵させた。strontium cerate barium cerate	A.L.Samgin他9	高温電気化学研究所 (ロシア)	BG以上のn,数十分の1秒より短いパルス状発生。試料製作・電気化学的処理熱サイクル条件等がn発生に影響。温度に対する中性子放出の再現性は相変化に関係。
N2.8	単結晶LiNbO ₃ + D ₂ 単結晶LiNbO ₃ + H ₂ 40mmステンレス球、50Hz、3mm振幅。3mmから1μmへ微粉化(15分)。鋸山(-100m地下)	T.Shirakawa他10	都立大 東海大 大妻女子大	n発生以下の通り(count/hr) 単結晶LiNbO ₃ + D ₂ : 6.4±0.5 単結晶LiNbO ₃ + H ₂ : 5.7±0.7 BG : 5.7±0.08 統計的にD系では有意なn発生
N2.10	LaSm, LiSm, LaNdへの電子線照射による核変換	Yu.N.Bazhutov 他6	(ロシア)	結果なし
N2.12	0.6mol K ₂ CO ₃ 中Pd,Ni,Pt電極で電位を加える。電極間距離は3-5mm, AC100V, 20-60msec	T.Matsumoto	北大	水の爆発、マルチプルニュートロンの重力崩壊、小ブラックホール、星の生成、電極線の爆発
N3.1	重水素化チタンの相変化 H(D)/Ti~2ではcubic→tetragonal	J.F.Fernandez 他3	Universidad Autonoma de Madrid (スペイン)	結果なし
N3.6	Pd線へのD ₂ 吸収・放出時の中性子測定、地下施設、	S.E.Johns	Brigham Young Univ. LANL (米)	D放出と中性子発生に強い相関、piezonuclear fusionの検証。
N3.11	D ₂ -Ti系中性子測定、	M.Agnello 他6	INFN Lab. (イタリア)	結果の記述無し
N4.1	オクロ釷床での同位体異常(D/H=127ppm,天然D/H<150)	W.J.M.F.Collis	イタリア	cold fusion に因るものではない。
N4.2	D ₂ -プロトン導電性固体電解質からの中性子放出	L.A.Samgin他5	高温電気化学研究所 (ロシア)	BGレベルの4σを越える中性子を検出。
N4.9	中性子バースト測定のための新装置の開発	W.Xiazhong 他8	中国原子力研究所(中国)	装置の開発。

3. Materials

番号	実 験	結果又は概念	発表者	所属
M-1		水素拡散の熱力学的研究	Oriani	Univ. of Minnesota (米国)
M1-2		Pd 又はPd合金中の核反応過程の研究	Fleischmann ら	IMRA-EUROPE (フランス)
M1-4	Pd, Pd-Rh, Pd-Ag合金 1M LiOD	高電流密度がDの吸蔵に重要、D/M=1.0がPd Rh (1:1)合金で達成	Akita ら	IMRA-JAPAN (日本)
M1-5	パルス電解、 50-20000 Hz, 0.3A/ns 10A/cm ²	電解時間に依存してD/Pdが上昇し、Dの吸着速度が減少	Celani ら	INFN-LNF (イタリア)
M2-1	Pd, D ₂ OとH ₂ SO ₄ 混合液	過剰発熱と電極の部分的な溶融を確認	Dash ら	Portland State Univ. (米国)
M2-2		電極中のD ₂ の不均一分布に関する研究	Huggin ら	Stanford Univ. (米国)
M2-3	Pd LiH-LiCl-KCl溶融塩	Pd-Li合金の製造可 H/Pd $\sim$ 0.05 $\pm$ 0.02	Okamoto ら	IMRA-Material (日本)
M2-4	Pd 0.1M LiOD/D ₂ O	Pd電極中のLi, D, Hの状態に関する研究報告	Miyamotoら	Tokyo Metropolitan Univ. (日本)
M2-5		D/Pd=0.82以上の時のPd格子中のDの状態に関する報告	Lahaina	Hawaii (米国)
M2-6		音響ルミネッセンスを用いる研究	Fukushimaら	Tokyo Metropolitan Univ. (日本)

番号	実験	結果又は概念	発表者	所属
M2-7	Ni, LiH-LiCl-KCl溶融塩 400 °C	サイクリックボルタムメトリ-を用いるNi電極の熱力学電気化学的研究	Liaw ら	Hawaii Nat. Ener. Inst. (米国)
M2-8	Pd-Ag, Pd-Ce合金	マスフローメーターを用いる合金中のD ₂ 濃度測定に関する報告	Sano ら	IMRA-Material (日本)
M2-9		異なる電極表面積を持つNi電極での実験報告	Criddle	Univ. of Ottawa (カナダ)
M2-10	Pd, 0.1, 0.6mMチオ尿素 + 1M LiOD 電流密度1000mA/cm ²	チオ尿素濃度が高い程D/Pd比が増加 (最大値D/Pd~0.94)	Tsuchida	IMRA-Japan (日本)
M2-11	D ₂ ガス注入法による実験	D/Pd~0.89を得た (D/Pd比は抵抗値より求めた)	Shao ら	Tsinghua Univ. (中国)
M2-12		PdHの電子軌道理論、超伝導理論に基づく研究	Waber ら	Michigan Tech. Univ. (米国)
M3-1		電極中での核融合反応モデルに関する研究	Swartz	JET Tech. (米国)
M3-2	Pd-Ag, H ₂ O+H ₂ SO ₄ , D ₂ O+H ₂ SO ₄	D ₂ O, H ₂ Oともに過剰発熱を確認	Dash ら	Portland State Univ. (米国)
M3-3	Pd-Rh合金、 1M LiOD/LiOH	D/Pd比は過電圧及びRh含量に依存して高い傾向にある	Hayakawa ら	IMRA-Japan (日本)
M3-4		H-Pd, H-Ni系における熱力学的研究	Liaw	Univ. of Hawaii (米国)
M3-5	金コーティングしたPd 1M LiOD	金コーティングした電極のD/Pdはしないものに比べて高い	Kubota ら	IMRA-Japan (日本)

4. Theory

番 号	モ デ ル	発 表 者	所 属 (国)	備 考
T1. 1	Neutron Transfer Reactions and Lattice-Induced Nuclear Decay	P.L.Hagelstein	MIT (米)	反応を4 つに分類し、熱及び核種の生成を理論的に説明
T1. 2	いくつかの理論的アイデア	G.Preparata	Univ. of Milano & INFN(伊)	
T1. 3	Deuteron-Induced Fusion in Various Environments	G.M.Hale T.L.Talley	Los Alamos National Lab. (米)	
T1. 4	Nuclear Fusion in Condensed Materials	Ichimaru	?	
T1. 5	Opposition and Support for Cold Fusion	M.Rabinowitz 他3	EPRI (米)	アブストラクト無し
T2. 1	The 3-Dimensional Resonance Tunneling in Chemically Assisted---	X.Z.LI	Tsinghua Univ. (中)	
T2. 2	Coulomb Barrier Transmission Resonance Transparency for CF with D and H	Y.E.Kim 他3	Purdue Univ. (米)	
T2. 3	Comments on Exotic Chemistry Models and Deep Dirac States for CF	R.A.Rice 他2	Purdue Univ. (米)	
T2. 4	Nuclear Reaction under Ambient Conditions	Y.Chuan-Zen C.Yi-Fang	Yunnan Univ. (中)	重水素の電子軌道理論
T2. 5	A Phenomenological Model of the CF in Pd(Ti)-D System	K.Hideo	静岡大 (日)	
T2. 6	On Possibility of non-barrier dd-fusion in volume of boiling D ₂ O during electrolysis	Vysotskii V.I. Kuz'min R.N.	Shevchenko Kiev Univ. (露)	
T2. 7	New H(D) Bohr Orbits in Quantum Chem. and CF Processes	J.P.Viger	Univ. of Paris (仏)	
T2. 8	Interaction of Thermo-nuclear and CF	C.Yi-Fang Y.Chuan-Zen	Yunnan Univ. (中)	量子理論→核反応への展開
T2. 9	CFのErzionモデル	Yu.N.Bazhtov G.M.Uereshkov	Erizon Center(露)	

番 号	モ デ ル	発 表 者	所 属 (国)	備 考
T2.10	Delocalization of Virtual Neutrons	P.Hagelstein S.Kaushik	MIT (米)	中性子移行反応に関する物質理論
T2.11	D-Pd System Nuclear Reactions and Fission under Ambient Conditions	Y.Chuan-Zan 他2	Yunnan Univ. (中)	トンネル効果—量子力学効果
T2.12	Symmetry Breaking and Hydrogen Energy in PdD _x	K.H.Johnson	MIT (米)	Pd中のD-D ポテンシャルエネルギーに関する量子化学的計算
T3. 1	The Role of H ion Band States in CF	S.R.Chubb T.A.Chubb	Research Systems, Inc. (米)	D-D核反応に関する固体物理—量子力学理論
T3. 2	Boson Condensation in the Solid State within a Sea of Fermions as a Model for CF	J.T.Waber M.de Liano	Michigan Tech. Univ. (米)	超伝導BCS 理論を用いる固体内核反応理論
T3. 3	Some Considerations on Multibody-Fusion in Metal-Deuterides	A.Takahashi	阪大 (日)	固体内d+d, d+d+d, d+d+d+d の競争反応理論
T3. 4	Embedded Atom Models for PdD and Applications	I.Chaudhary 他3	MIT (米)	PdD の分子力学シミュレーション
T3. 5	CF and New Physics (1)	J.F.Yang 他2	Hunan Normal Univ. (中)	中性子相互作用に関する理論の研究
T3. 6	The Nature and Consequences of the electron Capture Model---	J.Andermann	Univ. of Hawaii (米)	過剰発熱に関するD ₂ O による電子捕獲モデルの研究
T3. 7	Sonoluminescence, cold fusion and blue water lasers	T.V.Prevenslik	日本	
T3. 8	CF反応におけるpolyn-neutronsの役割	J.C.Fisher		CF反応は荷電粒子では起こらない。質量数>6 のpolyneutron の生成がキーとなり連鎖反応を持続させる。
T3. 9	統一モデル	R.T.Bush	Calif. State Polytech. Univ.	これまで発表されたモデルの特徴を列举
T3.10	Wave of deuterons and CF	N.Yabuuchi	High Scientific Res. Lab. (日本)	

番 号	モ デ ル	発 表 者	所 属 (国)	備 考
T3.11	Unitary Quantum Theory	L.G.Sapogin	Technical Univ. (露)	
T3.12	Mechanism of CF II	K.Tsuchiya	Tokyo National College of Tech. (日)	
T4. 1	ホットスポットモデルに基づくmechanistic model	R.E.Shioda	Inst. Indust. Org. Chem. (ポーランド)	金属へのD 吸収→金属結晶構造変化→機械的なストレス→D のbreakdown→fusion, 金属格子のD 濃縮部で生起。
T4. 2	Nonbarrier Double-Particle Fusion	V.I.Vysotskii	Shevchenko Krev. Univ. (ウクライナ)	
T4. 3	Coherent Nuclear Reactions in Crystalline Solids	S.N.Vaidya	Bhabha Atom. Energ. Res. Center (インド)	
T4. 4	Catastrophic Active Medium理論	M.R.Swartz	JET Technol. (米)	
T4. 7	電子によるスクリーニング効果と調和振動子共鳴	M.Rambaut	フランス	
T4. 8	Erzionモデル	Yu.N.Bazhutov	Erzion Center(露)	伝統的理論の枠で説明できない宇宙物理現象
T4. 9				
T4.10	Erzionモデル	Yu.N.Bazhutov 他2	"	原子炉RI廃棄物中での同位体変換をErzionモデルで分析
T4.11	Erzionモデル	V.P.Koretskiy	"	cold nuclear transmutationの触媒による物質の濃縮
T4.12	On the Mechanism of CF	Lev.G.Sapogin	Tech. Univ.(露)	
T4.13	Synergetic Activation Model	V.Filimonov	Belarus State Univ.(ベラルーシ)	
T4.14	CF Explained by Negentropy Theory of micro-drop of heavy water	R.Takahashi	日本	
T4.15	Ferroelectrics for CF	G.V.Fedorovich	Russian Academy of Sci.(露)	
T4.16	Dee's 1934 D-D Fusion Experiment and Possible Evidence for CF	Y.E.Kim	Purdue Univ. (米)	