

parity

第 32 卷第 5 号
2017 年 5 月 1 日発行
毎月 1 回 1 日発行
ISSN 0911-4815

PHYSICS TODAY 提携

パリティ

2017
05

磁気モノポールの探索 | 物理学者が歴史を学ぶ意義

なぜかうまくいく粉体抵抗力理論のなぞ | 創薬研究に応用できる超高分解能タンパク質画像

ステライルニュートリノ観測実験 | 1千万個の量子ドットのコヒーレント操作と観測 | 凝縮系核反応の現状と今後の発展



物理の雑誌

凝縮系核反応の現状と今後の発展

岩村康弘

はじめに

凝縮系核反応 (condensed matter nuclear reaction) とは、金属を主体としたナノスケールの材料と水素の相互作用によって発現する核反応を意味している。これはもともと、1989年に常温核融合 (cold fusion) として報告され、最近では低エネルギー核反応 (low energy nuclear reaction, LENR) とよばれることも多い。発見当初はなかなか現象が再現しないなどの問題があったが、当初想定された単純な核融合反応が低温で起こる現象ではないことや、メゾスコピック系¹であるナノスケールの金属材料でも観測されることなどが、しだいに明らかになってきた。現在においても完全に現象が解明されているわけではなく、系統的な実験データも不足しているが、この現象を活用することができれば、非常にコンパクトでクリーンなエネルギー源や革新的な放射性元素の変換技術を実現できる可能性がある。〈図1〉に凝縮系核反応の実験結果とそれに対応する応用先を示す。新エネルギー源としての応用は、たとえば金属ナノ粒子を担持した反応体に水素あるいは重水素を吸蔵させ、発生したエネルギーを熱

電変換素子などで電気に変換することが考えられる。また、放射性元素の変換装置は、のちほど説明するナノ構造の多層反応膜に放射性セシウム (^{137}Cs など) を添加し、重水素を透過させることで放射性元素を別の安定な元素に変換しようとする装置である。これまで核反応を起こすためには、加速器や原子炉などの高エネルギーの大がかりな装置が必要であるのに対し、凝縮系核反応では、コンパクトかつ低エネルギー消費で核反応を誘起することができるという特徴をもっている。

エネルギー発生研究

1989年に、パラジウム (Pd) を陰極として重水 (D_2O) の電気分解を行うと常温で核融合が起き、多量の熱が発生すると、英国のフライシュマン (Martin Fleischmann) と米国のポンズ (Stanley Pons) が常温核融合を発表した¹⁾。核融合反応を起こすためには、少なくとも1億度以上の高温が必要であるというのが常識であったため、当時も現在も超高温のプラズマ状態を維持して核融合反応を起こし、エネルギーをとり出そうという研究が行われている。そのため、フライシュマンたちの発表は、非常に簡単な手法で核融合の膨大なエ

ネルギーを獲得できる可能性のある研究として注目を集めた。

世界中の研究者がこの新しい現象の再現実験にトライしたが、多くは現象を再現できず、しだいに研究は下火になっていった。とくに米国エネルギー省 (Department of Energy) の常温核融合現象調査委員会が否定的な見解を発表したことにより、常温核融合が科学ではないかのような印象を与え、その後のこの分野にとって厳しい状況を生み出した。

しかし、一部の研究者は再現実験に成功した。日本では1993年から1998年にかけて新水素エネルギー実証試験プロジェクト (NHE) とよばれる通商産業省 (現・経済産業省) 主導のプロジェクトが実施されたが、エネルギーとして利用できる可能性を示す決定的な証拠を見つけることができず終了した。そのような環境のなかでも、少数の研究者は研究を継続し、①ナノスケールの材料あるいは粒子を使うと現象の再現性がよいこと、②必ずしも電気分解は必要がなく、ナノスケールの材料あるいは粒子に重水素を吸蔵させると発熱反応が観測されること、などがしだいにわかってきた。

1989年から20年くらいはPdを用いた重水素の電気分解という手法が主流であったが、研究の進展とともにナノスケール金属に重水素ガスを吸蔵させる方式が、再現性よく、熱を発生させることなどがわかってきた²⁾。さらに2011年頃からニッケル (Ni) 系のナノスケール金属と軽水素 (H_2) でもエネルギーが発生するといった報告^{3), 4)} がなされ始め、フライシュマンたちのPd/ D_2 系に比べるとNi/ H_2 系のほうが圧倒的に低コストであることから、一気に注

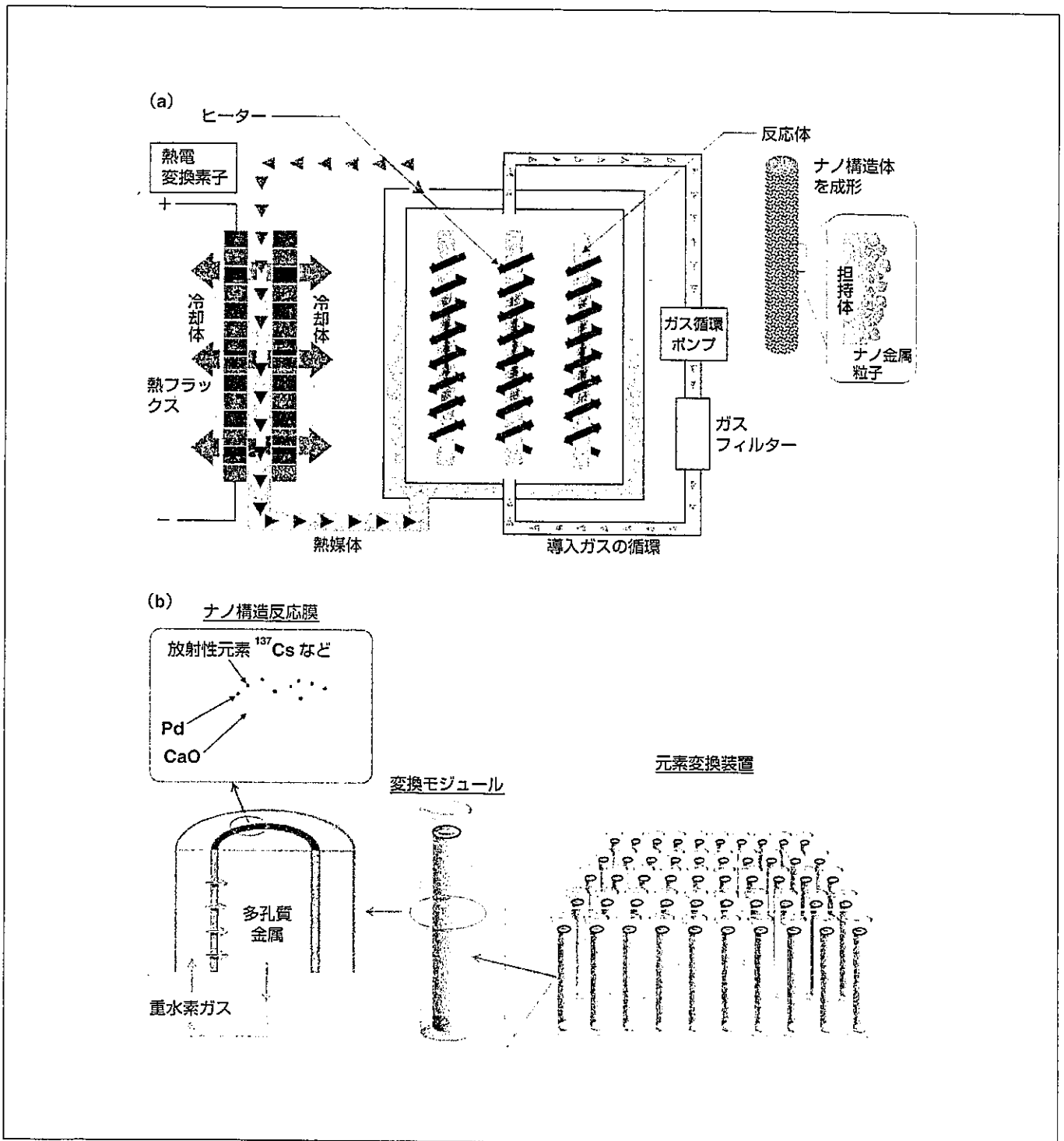
編集長からのお願い

本研究は話題になった「常温核融合」の原理とされるものとの関係があるというご意見のほか、理論的、実験的側面から検討しても、必ずしも物理分野で台意されているとはみなされ

ません。そこで本解説に関して皆さまからのご投稿をお待ちいたします。ご投稿いただいた原稿は通常の閲読過程を経て順次掲載いたします。

[編集長 大槻義彦]

† 「今月のキーワード」(p.57)参照。



〈図1〉想定可能な凝縮系核反応の応用先

(a)コンパクトなCO₂フリーエネルギー発生装置。(b)従来にない革新的放射性元素変換装置。

目度が上昇し、ベンチャー企業などがこの分野に参入してきた。

実験の方法は研究グループによって異なるが、基本的な構成は、〈図1〉のエネルギー発生装置と同様で、ナノスケール金属に水素あるいは重水素を吸蔵させるやり方は共通している。異なるのは、温度や圧力、反応誘発のさせ方などで、温度領域としては常温から1000°C超えまでの広い範囲の報告がある。エネルギー源として凝縮系核反応を用いる場合、反応を引き起こすために必要なエネルギーの最低でも数倍以上のエネルギー発生が必要と考えられるが、2016年仙台で行われた国際会議ICCF20(20th International Conference on Condensed Matter Nuclear Science)での報告などを考慮すると、反応誘発に必要なエネルギーの数十%程度という報告がもっとも多い。現在、大学での研究も行われているが、企業中心の研究が多いため、必ずしも研究の実態が明らかになっているとはいえない。また、すぐさま実用化されるレベルまで開発が進んでいるわけでもない。今後反応量を増大させ、反応を制御し、材料開発を進め、理論的裏づけを行うことで、新エネルギー源として登場することが期待できる。なお、紙面の関係で現在の状況の詳細な説明はできないが、興味のある方はこの分野の文献を集めたサイト<http://lenr-canr.org/>などを参照してほしい。

核変換研究

核変換関係では、Pdの電気分解などで観測されたおもに核分裂型の核変換⁵⁾と、ナノスケール多層膜への重水素の透過で観測された核融合型の核変換^{6)~8)}の2種類に大きく分けること

ができる。ここでは、再現実験などにも成功している核融合型の核変換について説明する。

〈図2a〉に示すようにナノスケールPd薄膜と酸化カルシウム(CaO)とPdの混合層から構成されるPd多層膜の表面にセシウム(Cs)やバリウム(Ba)などの元素を添加し、片側を重水素ガス、片側を真空状態にすると、Pdは重水素を透過させやすい性質をもっているため、Pd多層膜の重水素側の表面で重水素ガス分子が重水素に解離し、多層膜中を透過する。このさい、添加したCsなどの元素がまったく存在していなかった別の元素に変換される。実験は通常、重水素ガスの圧力が1気圧程度、試料の温度は70°C程度で行われる。

〈図2b〉は真空容器内に設置したX線光電子分光法[†](X-ray photoelectron spectroscopy, XPS)で元素の時間変化を観測した結果である。これはCsを添加したPd多層膜に重水素ガスを透過させると、プラセオジウム(Pr)という元素が検出されることを確認している。〈図2b〉からわかるように、検出されたPrは 10^{14} atoms/cm²のオーダー(数十ナノグラム/cm²オーダー)である。詳細な議論は論文などに記述しているが、対照実験からPrが検出されないことから、重水素ガス中にPrが含まれていて、それが集積したとは考えられない。仮に不純物が集積したと考えたとしたら、Pd多層膜中の不純物Prがその候補となる。しかし、対照実験のPd多層膜を分析しても、当時実施した通常分析法ではすべて検出限界以下であった。さらに、最近の豊田中央研究所の非常に高感度な誘導結合プラズマ質量分析法[†](inductively

coupled plasma mass spectrometry, ICP-MS)を用いた研究⁹⁾によると、対照実験から 10^{10} atoms/cm²オーダー(2~20ピコグラム/cm²)のPrが検出されており、実験で得られた数値の3~4桁以下である。したがって、Pd多層膜にCsを添加し重水素を透過した実験で得られるPrを、Pd多層膜中の不純物が集積したものと考えることは不可能である。

元素変換反応はCsだけではなく、〈図2c〉にあるような数多くの元素に対して確認できており、変換された元素はすべて安定元素である。変換される元素に2つの重陽子(d, 重水素ガスが解離した原子)、4つのd, 6つのdが反応して元素が形成されるという規則性が観測されている。また、アルカリ金属やアルカリ土類金属が変換しやすい傾向があり、これらは、反応のメカニズムと何らかの関係があると考えられる。

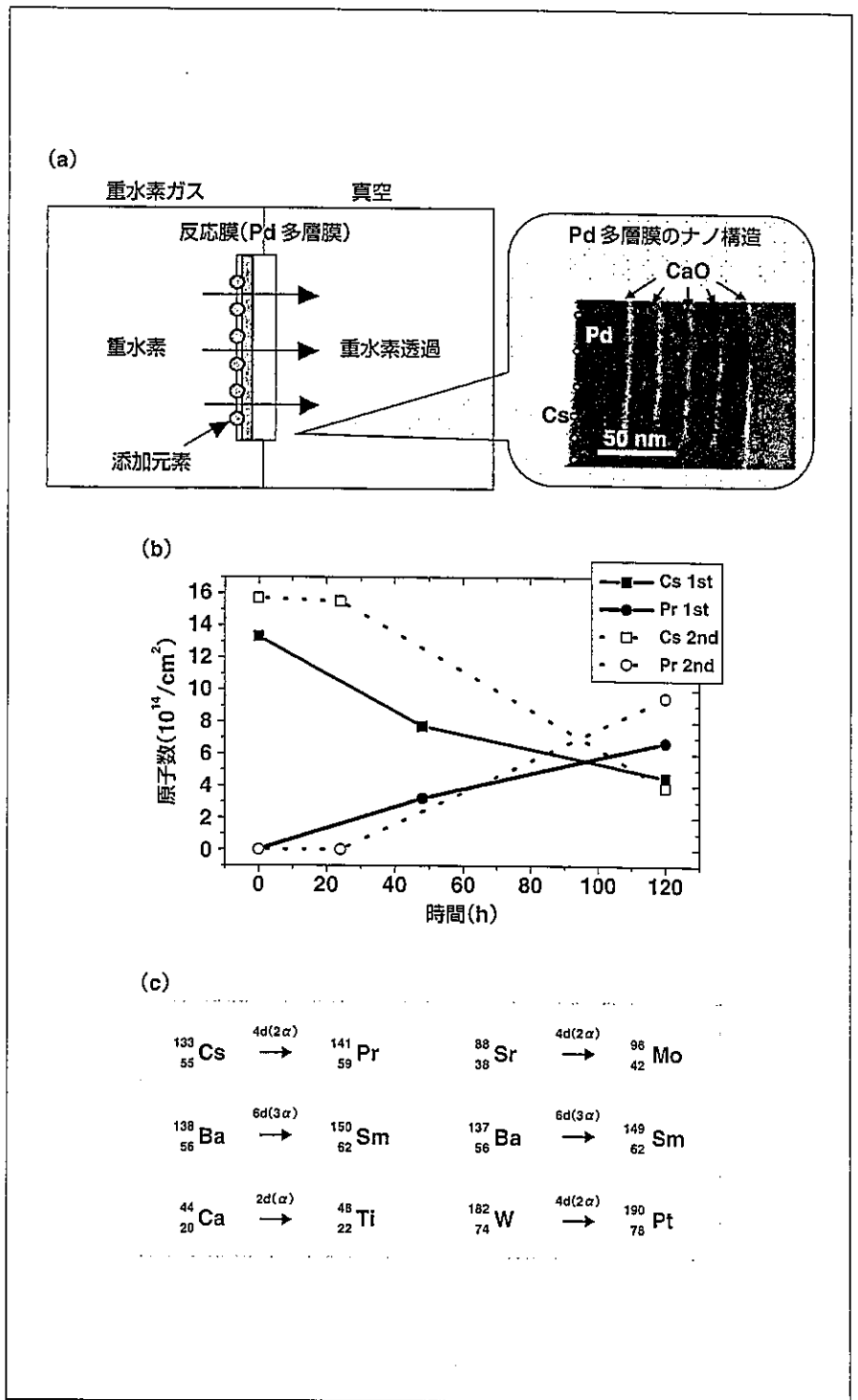
これまで、いくつかの再現実験の成功が報告されたが、そのなかで、比較的最近論文が発表された豊田中央研究所の結果⁹⁾について、簡単に述べる。上記と同様にPdおよびCaOの多層膜を作成し、そこにCsを添加し、重水素を透過してその後Pd多層膜の表面の元素を分析している。元素の分析はICP-MSを用いている。多層膜にCsをイオン注入し、重水素を透過させたもので、3回行って3回ともPrが検出されており、 $(1\sim 2) \times 10^{12}$ atoms/cm²のオーダーのPrが検出されている。それに対してCsを添加しない場合やCsを添加せず多層膜でない場合、Csを添加して軽水素を透過した場合などの対照実験の結果はCsを添加して重水素を透過した場合に比べ十分に低く、文献6を再現し

たとしている。対照実験は18回行われており、透過後のPrの分析値は9回が検出限界以下、9回が 10^{10} atoms/cm²オーダーであった。この豊田中央研究所の結果は完全に独立した環境で現象を再現しており、凝縮系核変換現象の存在を強く示している。

以上のようにナノスケール多層膜を用いた核変換現象の存在はほぼ間違いないと考えられるが、反応量は通常数ナノから数十ナノグラムオーダーにとどまっており、放射性元素の変換装置に応用するためには、さらに反応量の増大が必要である。実用化に向けた研究は三菱重工業(株)と東北大学の共同研究で実施されており、①表面の重水素密度、②Pd表面層の電子状態、に着目して研究が進められている。①については、電気化学的手法を用いて等価的に高い重水素圧力をPd表面に加えることで重水素密度の向上を図り、反応収量を2桁程度増大させている¹⁰⁾。②については、CaO以外の材料の実験結果が報告されており、今後さまざまな観点からの実用化に向けた取り組みが期待できる。

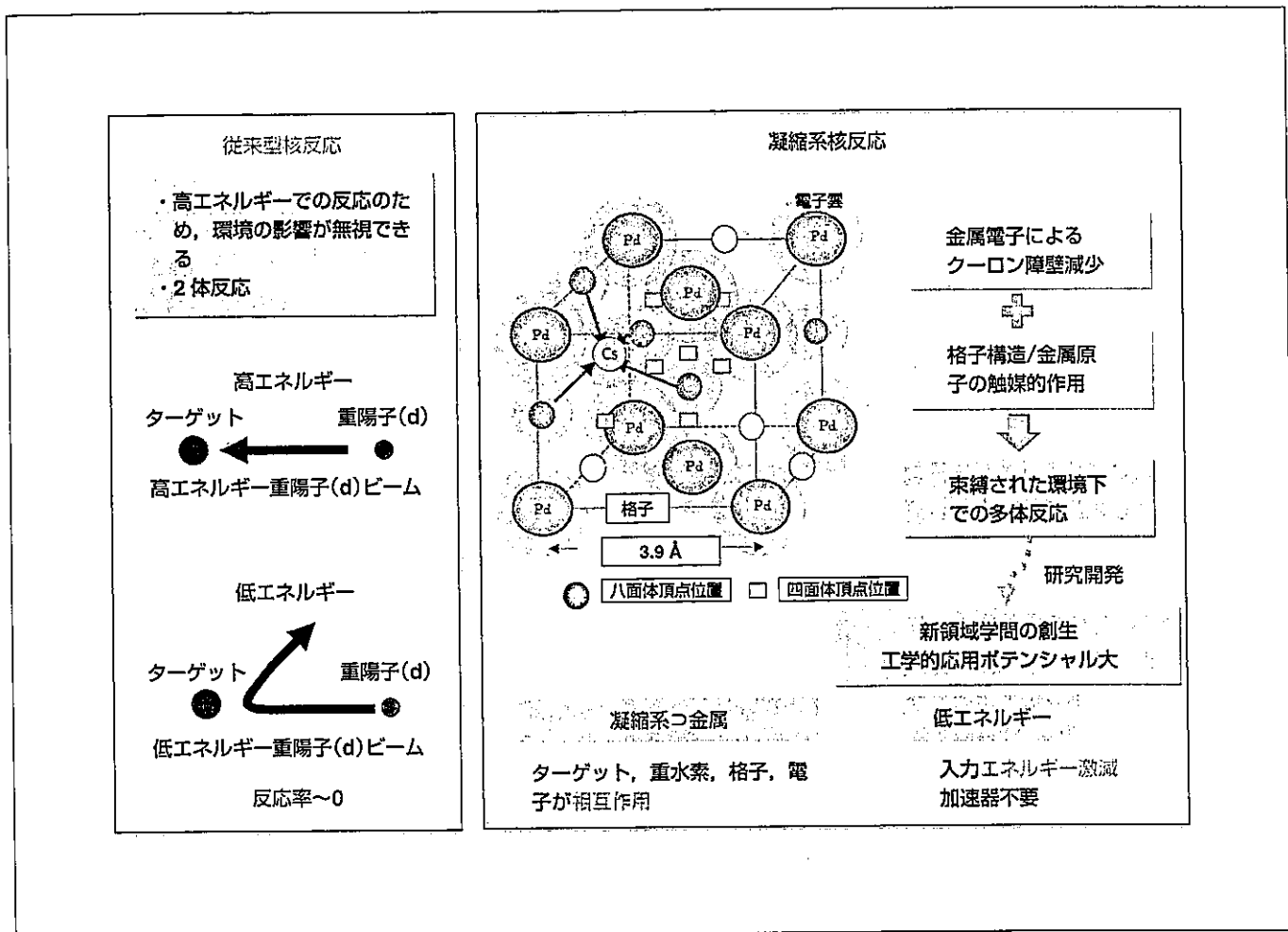
凝縮系核反応と従来の核反応の比較

ここまでは新元素変換を中心に説明を行ってきたが、新元素変換を含め凝縮系核反応についての研究結果はまだまだ少ない状況である。この現象の反応理論を構築するのは非常に難易度が高く、数多くの理論家が独自の理論を提案しているものの、皆が一致して支持する理論は確定していない。しかし、凝縮系核反応の実験結果やその発生する条件や環境について考察すると、〈図3〉に示すような明らかな違いがある。



〈図2〉凝縮系核反応の例(核変換)

(a)反応の誘発手法。(b)CsからPrへの変換。(c)本手法で観測された反応例。



〈図3〉凝縮系核反応と従来型核反応

従来の核反応実験およびその理論体系は基本的に2体反応を想定しており、たとえばdのビームを高エネルギーでターゲットに照射すれば、さまざまな核反応が起こる。たとえば、ターゲットをdとすればdd反応が起き、中性子(n)や陽子(p)などを放出するが、MeV以上のエネルギーでの話であり、70°C (meVオーダー)近傍の低いエネルギーでは何も起こらないことになる。従来の核反応の理論は高エネルギー粒子の核反応を扱っているため、ターゲット

の環境の影響は無視されている。一方、凝縮系核反応が発生する環境は従来型核反応と以下のような点が異なっている。

- ①金属中の電子の海のなかに重水素あるいは水素が存在して、ターゲット(〈図3〉ではCs)のまわりに電子が多数存在し、クーロン障壁が減少していること。
- ②重水素あるいは水素が低いエネルギーであるため、ホスト金属の格子

中に存在し、存在位置などが束縛されていること。

- ③報告されている凝縮系核反応は多体反応である場合が多いこと。

〈図3〉はPdの面心立方格子の八面体頂点サイトに重水素4つが存在し、Csと反応する想像図を示している。従来型核反応モデルは自由空間での高エネルギー粒子を対象としており、上記のような特徴をもった凝縮系核反応にそのまま適用することはできない。

そのため新たな理論モデル構築が必要である。先に述べたように、確立した理論はないが、今後系統的な実験データの蓄積が進むにつれ、凝縮系核反応の物理的描像がしだいに明らかになっていくと思われる。

今後の展望

従来の核物理学の常識ではなかなか受け入れにくい凝縮系核反応ではあるが、さまざまな研究機関で再現実験に成功した例は数多く、凝縮系核反応が実際に起こること自体は間違いない。問題はこの現象が世のため人のために利用できるようになるかどうかである。近年、おもに凝縮系核反応を利用した新エネルギー源の開発に欧米のベンチャー企業が多数参入してきており、研究開発が活発化してきている。この分野で世界的にもっとも大きい国際会議が2016年10月2日から仙台で開かれ (<http://iccf20.net/>)、着実に研究が進んでいることが実感された。しかし、まだまだ不明なことは多く、この技術を実用化するためには、幅広い分野の専門家の力が必要である。世界のエネルギー環境問題がますます厳しくなってくることから、とくに若い研究者・技術者たちに興味をもってもらい、凝縮系核反応に関する研究開発が進むことを強く期待している。

★ ★ ★

著者が研究開発でお世話になってきた三菱重工(株)の関係者、また東北大学共同研究部門の笠木名誉教授、伊藤客員准教授、また共同研究部門を支えている(株)クリーンプラネットの吉野社長、服部取締役をはじめ関係者に深く感謝したい。(財)熱・電気エネルギー技術財団、(株)テクノバの支援に感謝したい。大阪

大学高橋名誉教授、神戸大学北村名誉教授、東北大学橋爪教授、慶應義塾大学杉浦教授、東京大学福谷教授、物質材料研究機構西村ユニット長、ジョージワシントン大学ネーゲル教授、イタリア核物理研究所チェラーニ博士、各先生方から貴重なお意見をいただいた。関係各位に感謝するしだいである。

参考文献

- 1) M. Fleischmann *et al.*: J. Electroanal. Chem. **287**, 293(1990).
- 2) Y. Arata *et al.*: Proc. Jpn. Acad. **74**, Ser. B, 155(1998).
- 3) A. G. Parkhomov: Int. J. Unconvent. Sci. **7** (3), 68(2015).
- 4) A. Kitamura *et al.*: Current Sci. **108**(4), 589(2015).
- 5) T. Mizuno *et al.*: J. New Energy **1**(3), 31(1996).
- 6) Y. Iwamura *et al.*: Jpn. J. App. Phys. **41**, 4642(2002).
- 7) Y. Iwamura *et al.*: J. Condensed Matter Nucl. Sci. **4**, 132(2011).
- 8) Y. Iwamura *et al.*, Current Sci. **108**(4), 628(2015).
- 9) T. Hioki *et al.*: Jpn. J. Appl. Phys. **52**, 107301(2013).
- 10) 鶴我薫典ほか：三菱重工技報 **52**(4), 104(2015).

パリティの好評連載を
単行本化

自然現象と 物理法則の

あいだ

物理の本質は
公式だけではわからない

鹿兒島 誠一 著

(明治大学理工学部教授 理学博士)

A5判・144頁 定価(1,600円+税)

ISBN978-4-621-08330-7



現象の抽象化と単純化、モデル化という科学全般にかかわる問題を、身近な例でやさしく解説。法則や公式がなぜ必要で、どう役立つかがわかる。

目次

- 第1章 どれがいちばん偉い? クーロンの法則、フックの法則、摩擦の法則 / 第2章 カーリングとニュートリノ / 第3章 雨粒でケガをしないのはなぜ? / 第4章 風船の吹きはじめに力があるのはなぜ? / 第5章 時計の正確さは何で決まる? / 第6章 夏の鉄道のレールはなぜ伸びる? / 第7章 カオスとソリトン / 第8章 アンテナはなぜ細長い? / 第9章 楽器の基音と倍音(1) / 第10章 楽器の基音と倍音(2) / 第11章 ヤモリとコウモリはなぜぶらさがれる? / 第12章 GPSの生みの親はアインシュタイン?

目で楽しむナノの世界

Roger Moret 著 鹿兒島 誠一 訳

A5判・112頁 定価(1,600円+税)

ISBN978-4-621-08100-6

丸善出版株式会社

〒101-0051 東京都千代田区神田神保町2-17

神田神保町ビル6階

TEL(03)3512-3256 FAX(03)3512-3270

<http://pub.maruzen.co.jp/>

編集後記

世界でもっとも短い詩といわれる俳句は17文字(専門的には17拍というそうであるが)で奥深い世界観を伝えることができる。このスタイルは、縦書きならば眉間に収まって一目で全体がみえるので、読まなくてもみることによって瞬時に内容を把握できるという効果があるといわれている。『パリティ』の記事のタイトルの場合には、横書きなのでそういう効果は期待できないが、編集委員会でも毎回それぞれの記事の顔ともいべきタイトルをどのようにコンパクトでインパクトのあるものにするかが重要な議題になる。タイトルが魅力的でないと、読者に「この記事を読んでみよう」という気を起こしてもらえないと思うからである。最終的には執筆者(あるいは訳者)の意向を尊重することになるのだが、長すぎるタイトルの場合は、編集委員会から短縮案が提案されることが多い。タイトルが記事の顔ならば、表紙は雑誌の顔である。表紙画像をどうするかも編集委員会ではそれなりの時間を割いて議論している。こちらは編集室のスタッフが候補案を提示し、編集委員が選ぶという方式がとられている。編集委員がおもしろいと思う画像には読者の共感も得られるのではという期待があるからである。編集委員会では特集記事の企画や個別記事の内容だけでなく、雑誌の体裁にかかわる問題も数多く議論されている。読者の皆さんが雑誌を手にとり、記事を読まれるさいに、われわれのそのような努力に思いをはせていただくのも楽しみ方の1つかもしれない。

【編集委員長 小野嘉之】



●編集長

大槻義彦 早稲田大学名誉教授

編集委員会

●編集委員長

小野嘉之 東邦大学名誉教授

●編集委員

洪鋒雷 横浜国立大学工学研究院

関井隆 自然科学研究機構 国立天文台

橋本幸士 大阪大学大学院理学研究科

深尾良夫 海洋研究開発機構

●アドバイザー

家泰弘 日本学術振興会

石渡信一 早稲田大学名誉教授

大場一郎 早稲田大学名誉教授

小林俊一 東京大学名誉教授

大師堂経明 早稲田大学名誉教授

福山秀敏 東京大学名誉教授

藤井昭彦 上智大学名誉教授

矢崎紘一 東京大学名誉教授

山本祐靖 東京大学名誉教授

●編集スタッフ: 安平進, 堀内洋平

佐久間(金道)弘子, 福田教紀,

稲垣朋子

●編集協力・組版: 三美印刷株式会社

パリティ Vol.32 No.05

PARITY 2017年5月号

2017年5月1日発行

編集人——大槻義彦

発行人——池田和博

発行所——丸善出版株式会社

〒101-0051

東京都千代田区神田神保町2-17

編集部 TEL(03)3512-3267

FAX(03)3512-3272

営業部 TEL(03)3512-3256

FAX(03)3512-3270

<http://pub.maruzen.co.jp/>

本誌掲載記事の無断転載を禁じます。

本誌の複製権・翻訳権・上映権・譲渡権・公衆送信権(送信可能化権を含む)は丸善出版(株)が保有します。

JCOPY (社)出版者著作権管理機構委託出版物)

本誌の無断複写は著作権法上での例外を除き、禁じられています。複写される場合は、そのつど事前に(社)出版者著作権管理機構(電話 03-3513-6969, FAX 03-3513-6979, E-mail: info@jcopy.or.jp)の許諾を得てください。

広告主索引

●
化学同人

表2

印刷・製本——大日本印刷株式会社