



展 TENBO 望

投 稿

低エネルギー核反応による 新しい核エネルギーへの期待



田中 栄一
Tanaka Eiichi

(浜松ホトニクス(株) 顧問、
放射線医学総合研究所 名誉研究員)

1 はじめに

2011年3月11日の東日本大震災による福島第一原子力発電所の事故以来、日本の電力不足は深刻で、休止中の原発の再稼働の可否や今後の原発への依存度をめぐって議論が活発である。脱原発を目指すには代替エネルギーが必要である。火力発電の増強は石油、石炭、液化天然ガスの大半を輸入に頼る日本では資源の面からも地球温暖化の面からも好ましくない。クリーンなエネルギー源として太陽光発電、風力発電などが検討されているが、狭い国土の日本では限界があり、天候に左右されるという欠点もある。

1989年にM. Fleischmann & S. Pons¹⁾がパラジウムと白金を電極とした重水の電気分解によって異常な発熱があり、常温核融合が起こったらしいと発表して世間を騒がせたが、再現性が悪く、主流学会では認められなかった。その後、一部の人々によって研究が続けられてきたが、実用的な熱出力が得られないまま約20年が経過した。2011年になって、A. Rossiがニッケルと水素を燃料として、実用的に十分な熱出力(10~1,000 kW)を持つ常温核融合炉(Ni/H炉)を開発したと発表して関係者を驚かせた。少し

遅れてギリシャでも同様の装置を開発したと報じ、いずれも商品化を進めている。改めて常温核融合が新しい核エネルギー源として注目され、特に欧米で研究が活発である。

これらの動向は日本の主流学会やマスコミにはまだ公に取りざたされていないが、近い将来にNi/H炉が安全でクリーンなエネルギー源として実用化される可能性が高いと思われる。本稿では、この技術の概要と展望を述べる。

2 経緯

一般に原子核融合(熱核融合)は非常に高温・高圧では起こるが、常温では起こるはずがないと考えられていたため、前記Fleischmann & Ponsの発表は多くの科学者に衝撃を与え、マスコミも大きく取り上げた。多数の研究者によって追試が行われたが、再現性が悪く、熱核融合反応で観測されるはずの中性子や γ 線がほとんど検出されないことから、彼らの実験は発熱量の測定誤差ではないかと疑われた。また、過剰発熱の理論的根拠が明白でないため査読を条件とする学術誌にはほとんど採用されることがなく、主流学会から似非科学の烙印を押され、マスコミも次第に鎮静化した。

このような経緯から研究者数は激減したが、その後も一部の科学者によってパラジウムのほかジルコニウム、リチウム、ニッケルなどのメタルハイドライド（水素吸蔵合金）も視野に入れて、水素や重水素との常温核融合の研究が行われてきた。その結果、条件によっては電気分解や化学反応では説明できない過剰の発熱が確かに認められるが、熱核融合に伴うはずの中性子や γ 線が非常に少ないことが分かってきた。1996年頃に水野忠彦（北海道大学）は熱核融合とは異なった核反応が起こっているらしいことを指摘し、その頃からこの反応を熱核融合と区別して、低エネルギー核反応（Low-Energy Nuclear Reaction, LENR）と呼ぶようになった。そのほか、固体内核融合、凝集体内核融合などとも呼ばれるが、すべて同類のものである。広い意味で常温核融合も同様に用いられる。

当初は主にパラジウムと重水素（Pd/D反応）を用いた研究が多かったが、ニッケルと水素を用いたNi/H反応でも過剰の発熱が観測されることがF. Piantelli（1989年）やS. Focardiら（1994年）によって報告されていた。しかし、これらの出力エネルギーはせいぜい数十W以下で実用的なエネルギー源としては不十分であった。1994年には通商産業省資源エネルギー庁が約30億円を投じて新水素エネルギー実証試験プロジェクトをスタートさせたが、エネルギー源として有効な過剰熱現象は確認できないまま1998年に終了した。

ところが、その後13年を経た2011年に米国在住のイタリア人エンジニアA. Rossiが初めて実用的な熱エネルギー出力（1基当たり10kW程度）のNi/H炉を開発したと発表した。同年は奇しくも大震災で福島第一原発事故が発生した年である。Rossiはこの装置をEnergy Catalyzer (E-Cat)²⁾と命名し、同年1月から数回にわたって限られた人々を招待してボローニャ大学で実験デモを行った。同年10月28日にはE-Catユニットを107台接続して公称出力1MWの装置を組み上げ、匿名の顧客を含む限



図1 E-Catの1 MW装置

られた人々を招いて実験デモを行った（図1）。

この1 MW装置は運転後、入力電源を切った状態（Self-Sustained Mode）で公称出力の約半分の平均出力で5.5時間動作したといわれる。これらの実験デモは見学者が限定され、装置の反応炉の詳細は未公開で発熱量の測定にも技術的に不明瞭な点が多く、結果を疑問視する人も多かった。この1 MW装置は公開実験に立ち会った匿名顧客（米国海軍？）に200万USドルで売却されたと報じられている。イタリアの科学雑誌*Focus*によると、Rossiはこの匿名顧客から更に12基の追加注文を受け、また別に同様な装置13基から構成された熱出力13 MWの装置を製造中であるという（2011年11月18日）。2011年半ばにはギリシャのDefkalion社がE-Catとほぼ同様な装置（Hyperion）の開発に成功し、商品化すると発表した（図2）。

3 Ni/H炉

代表的な装置として、Rossiらの出力10kWのE-Cat装置の概要を述べよう。数百ccの反応セルに約100gのニッケル粉末と後述の触媒と高温・高圧の水素ガスを封入すると、多量の水素原子がニッケルの格子間に吸蔵される。さらに、電熱器でセルを加熱し、温度が数百度に達するとニッケル原子核と陽子が融合して核反応が起こり、ニッケルの原子番号及び質量数が

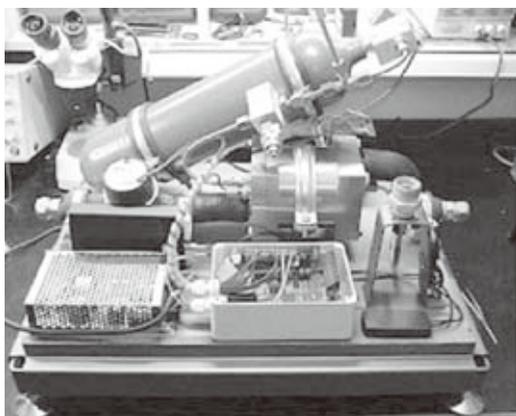


図2 Defkalion 社の Hyperion 装置

1 増加して銅に変換され、このとき多量の反応熱が発生する ($\text{Ni} + \text{H} \rightarrow \text{Cu} + \text{Heat}$)。中性子や高エネルギー γ 線はほとんど放出されず、軟 X 線が放出されるが 2 cm 程度の鉛で十分遮蔽される。残留放射性物質もほとんど検出されない。使用済みの燃料からは銅が検出される。図 3 は初期の E-Cat 装置の反応セルの構造 (推定) である。

燃料のニッケル粉末は粒径がナノ (又はマイクロ) スケールであることが重要なポイントである (マイクロスケールの場合には表面処理によって細かい突起を作る)。触媒 (詳細は不明) には炭酸カリウムが含まれ、水素分子を 2 個の水素原子に分解してニッケルの格子間に効率良く吸蔵させる効果がある。また、鉄ダストや炭素粉末などが含まれるらしいが確かではない (Hyperion では水素分子の分解にプラズマ点火装置を利用している)。

ニッケルには質量数が 58 (68.1%), 60 (26.2%), 61 (1.14%), 62 (3.63%), 64 (0.93%) の 5 種類の同位体があるが、Rossi によると反応の大部分は ^{62}Ni と ^{64}Ni であるので、これらの同位体を濃縮したものをを用いている (濃縮は必ずしも必要ではない)。 ^{62}Ni と ^{64}Ni の濃縮は簡単で、触媒の添加も含めてそのコストは燃料の全コストの 10% であるという。 ^{62}Ni と ^{64}Ni

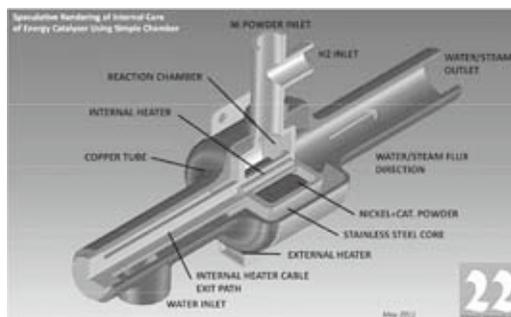


図3 E-Cat の反応セル (NASA の推定)

は陽子と融合してそれぞれ ^{63}Cu と ^{65}Cu に変換されるが、これらの同位体は安定であるので残留放射性物質がほとんど検出されないことと一致する (Defkalion 社によると、ニッケル同位体のうち、 ^{61}Ni 以外はすべて有効で、同位体濃縮は行っていない)。

Ni/H 炉の性能の 1 つは入力エネルギーに対する出力エネルギーの比 COP (Coefficient Of Performance) で表される。最近の E-Cat は 6 以上の COP を保証しているが、Hyperion は 25 以上の COP を保証している。1 つの反応セル当たりの出力エネルギーは数 kW ~ 数十 kW である。出力の制御方法は明らかではないが、例えば高周波発生装置の出力などが利用されていると思われる。Ni/H 炉の性能はニッケル粉末の構造や添加する触媒にあると考えられるが詳細は不明である。Ni/H 炉は前記以外にも F. Celani (イタリア国立核物理学研究所) らによって研究されているが、その出力は数十 W に止まっている。

4 理論

一般に 2 つの原子核が融合するには原子核間の電気的斥力によって生ずるクーロン障壁を超えるだけのエネルギーが必要である。LENR が反対される理由は常温でクーロン障壁を超えることができるという理論的根拠がないことと、熱核融合反応で生ずるはずの中性子や γ 線など

が実験ではほとんど検出されないことである。LENR の妥当性を示すためにはこれらの問題に対処できる理論が必要である。

現在までに多くの理論が提案されている。いずれも決定的なものではないが、次の2つが有力とされている。その1つは Y. Kim の BEC 理論³⁾で、水素又は重水素原子を吸蔵したナノスケールのメタルハイドライド (Ni) においてある条件が満たされると Ni 核と陽子の Bose-Einstein 凝縮 (BEC) が起こり、クーロン障壁が抑えられて Ni と H が核融合するというものである。ほかの1つは Widom-Larsen (W-L) 理論⁴⁾で、前記のような条件で水素原子核 (陽子) と電子が結合して極低運動量の中性子が発生し、Ni の中性子捕獲反応と β 壊変が起こるとして説明している (NASA (アメリカ航空宇宙局) は W-L 理論を、ナショナルインスツルメンツ社は BEC 理論を支持している)。

以下に W-L 理論を簡単に説明する。水素 (又は重水素) を吸蔵したナノサイズのメタルハイドライドに光などの電磁波が照射されると、その金属の表面では自由電子が集団的に振動して SPP (Surface Plasmon Polariton) が作られる。SPP 電子は集団的に移動するため、見掛けの重さが通常の電子よりはるかに重いような振る舞いをするので“重い電子”とも言われる。この SPP 電子は集団的に陽子 (又は重陽子) と結合して、極低運動量の中性子とニュートリノを発生する (重陽子の場合には2個の中性子が作られる)。極低運動量中性子は通常の熱中子に比べて非常に大きい吸収断面積を持つため極近傍の水素や金属 (例えばニッケル) の原子核 (原子番号 Z, 質量数 A) に取り込まれて新しい原子核 (Z, A+1) が作られる (中性子捕獲)。中性子は電気を持たないからクーロン障壁は問題にならない。

新しくできた原子核 (Z, A+1) が不安定な場合には β 壊変して原子核 (Z+1, A+1) になり、この壊変に伴って放出される高エネルギー γ 線は SPP 電子に集団的に吸収されて非常に多

数の低エネルギー光子 (軟 X 線を含む赤外線) に変換され、これらの光子は近傍の物体に吸収されて発熱する。すなわち、SPP 電子が γ 線の遮蔽の役割をしている。

W-L 理論によると、LENR は核融合ではなく、中性子捕獲反応である。もしそうであれば、LENR は質量数の大きい元素 (鉄以上) にも適用できるはずである (熱核融合では不可能)。現に、三菱重工業 (株) の岩村康弘ら⁵⁾ はパラジウムと重水素を用いた Pd/D LENR を利用して長寿命放射性廃棄物の処理 ($^{133}\text{Cs} \rightarrow ^{141}\text{Pr}$, $^{88}\text{Sr} \rightarrow ^{96}\text{Mo}$) や貴金属の製造 ($^{182}\text{W} \rightarrow ^{190}\text{Pt}$), 希土類元素の製造 ($^{138}\text{Ba} \rightarrow ^{150}\text{Sm}$, $^{137}\text{Ba} \rightarrow ^{149}\text{Sm}$, $^{184}\text{W} \rightarrow ^{188}\text{Os}$) の可能性を示し、世界の注目を浴びている。

重要なことは、いずれの理論でも燃料のニッケル粉末がナノスケールであると仮定していることで、実験事実とも一致する。ナノサイズの粉末は重量当たりの表面積が非常に大きいため、もはや物理学の一般法則は適用されず、電氣的、磁氣的、光学的、機械的、化学的などの各特性が同一成分の既存の物質と全く異なることがある。LENR はその好例のように思われる。

5 エネルギー源としての Ni/H 炉

LENR は核分裂、熱核融合に次いで第三の原子核反応である。Ni/H 炉はエネルギー源として次のような特徴がある。

- 核分裂型原子炉と比べて放射線、残留放射能、暴走事故などの危険性がない。過熱により Ni が融解するとナノサイズではなくなるため安全に停止する。
- CO₂ などの温室効果ガスやその他の環境汚染物質を発生しないので環境に優しい。
- 燃料のニッケルは豊富、燃料費が安い (約 1 セント/kWh)。
- 装置は小型軽量かつポータブルで、移動機器にも利用できる。

(e) エネルギー密度（単位重量当たりの出力エネルギー）が極めて大きい（ $10^5 \sim 10^7$ 倍）。

Ni/H 炉の1つのユニットの熱出力は数十 kW 以下であるが、そのユニットを複数組み合わせることで任意の熱出力の装置を設計できるので幅広い目的に利用できる。特に家屋、事務所、ビル、工場などの施設の冷暖房や発電装置に有用と期待される。発電装置は各地に分散され、地震等の災害にも強い。発電で余ったエネルギーはその場で暖房などに利用できる（熱電供給：Cogeneration）。燃料は少量で寿命も長いので、陸、海、空、宇宙の交通機関や輸送機関にも最適である。1年間以上も燃料補給なしで走れて、しかも燃料費がゼロに近い電気自動車も可能となる。長距離航空機や船舶でも燃料の重量が少なくなくて済むので、輸送可能な乗客数や貨物の量を大幅に増加でき、さらに燃料経費が激減するので旅行運賃や貨物の輸送コストは激減すると期待される。

Ni/H 炉の普及が進むと石油などの化石燃料の需要は次第に低下し、その確保をめぐる国際的紛争は解消する。エネルギーコストは大幅に下がり始め、政治、経済、産業、文化などに大きな変革（パラダイムシフト）が起こり始めるであろう。

6 実用化とその問題点

Rossi によると 2011 年末に既に 10 kW の家庭用 E-Cat を 1 万台受注している。彼は大量生産によって低価格のホームユニットを製作し、販売することを目指している。その装置は大きさ 12 インチ×12 インチ×4 インチ、重量 9 kg で、価格は 900 US ドルである。燃料（Ni 粉末）の交換は 6 か月ごとに消費者自身でできるようにするという。1 回の燃料費は 10 US ドルである。Rossi はこのホームユニットを米国の Leonardo 社から 2013 年に販売を開始する計画である。その生産能力は年間 100 万台という。

また、新しい設計の熱出力 1 MW のプラントを既に商品化して 2011 年 11 月末に初出荷している。このプラントは 52 個の小さい E-Cat を 1 つのコンテナに収納したもので、2012 年中に 30~100 台販売する計画であるという。現在、1,000°C 以上の温度で動作する熱出力 1 MW の工業用 E-Cat を開発中である。

Defkalion 社（ギリシャ/カナダ）も目標として年間 30 万台の Hyperion 装置を販売すると報じている。熱出力は核反応セルの数（1~9）に応じて 5~45 kW の 4 種類のモデルがあり、燃料補充までの期間は 6~34 か月としている。

米国の Brillouin energy 社も LENR を利用したボイラー（蒸気発生器）を 2013 年に商品化すると発表している。この装置は E-Cat や Hyperion とは異なり、Ni/H 炉で発生した中性子の捕獲によって起こる (${}^1\text{H} \rightarrow {}^2\text{H} \rightarrow {}^3\text{H} \rightarrow {}^4\text{H} \rightarrow {}^4\text{He} + \beta^- + \text{Heat}$) の核反応を利用している。

米国では NASA が古くから LENR の研究に熱心で、既に Rossi らとは独立に Ni/H 炉を開発し、特許も申請しているが、最近それが Rossi の E-Cat と同様なものであることを公表した⁶⁾。US Navy (SPAWAR) も長い研究の歴史があり、前述の 1 MW の E-Cat 装置を Rossi から購入したと報じられている。MIT (マサチューセッツ工科大学) は当初常温核融合に反対したことで有名であるが、その後考えを改めて LENR の研究を続けている。最近 JET Energy Inc. と協力して、その企業が開発した装置 (NANOR) の公開実験を MIT で実施した (2012 年 1 月 23~31 日)。この装置では重水素の融合反応 ($\text{D} + \text{D} \rightarrow \text{He} + \text{Heat}$) を利用している。そのほかにも複数のベンチャー企業が名乗りを上げている。またミズーリ大学、イリノイ大学、ポローニヤ大学なども LENR が正しい技術であることを認めており、米国のナショナルインスツルメンツ社やドイツのシーメンス社も LENR 関連事業への参入を表明している。

T. Houwelingen は LENR 技術の現状、信頼性、将来性などに関する詳細な調査を行って、ウェ

ブサイト⁷⁾に公表している。それによると LENR は 100% 正しい科学技術である。しかし、現在 LENR 炉 1 基の熱出力が数十 kW に達しているのは Leonardo 社, Defkalion 社, Brillouin energy 社の 3 社のみで、しかもそれらの性能は第三者の認証を得ていない。その他はほとんど数十 W 未満である。出力の制御や熱から電気エネルギーへの変換技術などにおいても未解決な部分が多い。このような事情を考慮してか、前記の調査⁷⁾ (Ver.3.91, 2012 年 11 月 14 日) では、LENR 炉の実用機としての完成度は 2013 年末までに 33%, 2015 年末までに 66%, 2017 年末までに 95% と予測している。

LENR の真否を議論する時代は終わったようである。発熱のメカニズムや理論はまだ完全に解明されていないが、物理学の歴史を振り返っても、未知の現象の発見が先行し、その理論が後から展開された例は枚挙に暇がない。

現在、LENR に関する情報は主に LENR 関連の学会や国際会議のほか、インターネットによって広く流通しているが、日本の主流学会やマスコミにはほとんど報道されていない。また、ほとんどの国の政府も一見無関心である。その原因は LENR が似非科学であるという誤った社会通念と、それによって生じた確執から容易に脱却できないからであろうか。少なくとも最近の欧米ではそのような事情は急速に改善され始めている。近い将来、LENR の研究が進み、又は商用 Ni/H 炉が市場に出始めると、LENR の真価が一般社会に理解され、エネルギー政策の見直しとともに、Ni/H 炉の性能向上や新型 LENR 炉の本格的な研究・開発が重要な課題になるであろう。

7 おわりに

我々人類は数十年間にわたって核分裂型原子

炉を利用してきたが、最近になってその安全性の確保と核廃棄物の最終処分に苦慮している。より安全とされる熱核融合炉の開発にも長期にわたって膨大な努力と巨額の予算を費やしてきたが、まだ実現の目処はついていない。

我々は今やっと理想的な第三の核エネルギーを手に入れようとしている。しかし、その技術はまだ幼年期である。日本は米国やイタリアと並んで比較的 LENR 研究の盛んな国である。一刻も早く“似非科学”をめぐる確執から脱却して世界の LENR の現状を把握し、産学官の総力を挙げて LENR の研究・開発・利用に取り掛かるべき時期がきている。

参考文献

- 1) Fleischmann, M., Pons, S. and Hawkins, M., Electrochemically induced nuclear fusion of deuterium, *J. Electroanal. Chem.*, **261**, 301-308 and errata in **263**, 187-188 (1989)
- 2) Energy Catalyzer - Wikipedia
http://en.wikipedia.org/wiki/Energy_Catalyzer
- 3) Kim, Y.E., Generalized Theory of Bose-Einstein Condensation Nuclear Fusion for Hydrogen-Metal System, Purdue Nuclear and Many Body Theory Group (PNMBTG) Preprint PNMBTG-6-2011 (2011)
- 4) Widom, A. and Larsen, L., Ultra low momentum neutron catalyzed nuclear reactions on metallic hydride surfaces, *Eur. Phys. J. C*, **46**, 107-111 (2006)
- 5) Iwamura, Y. *et al.*, Observation of low energy nuclear transmutation reactions induced by deuterium permeation through multilayer Pd and CaO thin film, *J. Condensed Matter Nucl. Sci.*, **4**, 132-144 (2011)
- 6) NASA and LENR (Jan. 27, 2012)
<http://e-catsite.com/2012/01/27/nasa-and-lenr/>
- 7) Houwelingen, T., Is commercial low energy nuclear reaction (LENR) the real deal?
<http://www.lenrweb.com/>