

学術功績賞受賞記念



マイクロ波研究から核融合・核分裂複合炉

Emerging Trends: From Microwave Research to Nuclear Hybrid Fusion/Fission Reactor

中部大学 佐藤元泰、中谷伸

Chubu University Motoyasu Sato, Shin Nakatani

〒487-8501 愛知県春日井市松本町 1200

e-mail: satomoto@isc.chubu.ac.jp

1. はじめに

中谷伸君と私は、核融合中性子によって、定常運転する核融合と核分裂のハイブリッド原子炉の実現を目指しています。

新技術は、原理が分かってから数年から十数年で工業的に実用になる。事例は、核分裂の理論から原子炉、マイクロ波から電子レンジ、ライト兄弟の初飛行から戦闘機など枚挙に暇が無い。

原子炉[1]は、核分裂反応で発生した中性子が、次の核分裂を誘発する連鎖反応を利用するエネルギー源である。一回の核分裂反応では、複数の高速中性子が生まれる。これらが、次の核分裂を引き起こして新たな中性子を発生させるまでを、中性子の世代と呼ぶ。そして、ある世代の中性子数と一つ前の世代の中性子数との比をとり、これを増倍率 k と云い、

$$k = \frac{\text{ある世代の中性子数}}{\text{一つ前の世代の中性子数}}$$

で表される。最初に何らかの方法で、体系に中性子を δ 関数的に与えたとき、第 N 世代の中性子量は、 k を公比とする等比級数の和で次式となる。

$$S_N = \frac{a_1(k^N - 1)}{k - 1}, \quad (k \neq 1) \quad (1)$$

十分に時間が経過したならば、体系内の中性子数は、 $k < 1$ のとき収束し、これを未臨界、 $k > 1$ のとき発散し超臨界、 $k = 1$ のとき、世代ごとの中性子数は一定でありこれを臨界と云う。ウラン系では、1回の核分裂で、平均 2.4 個の高速中性子が発生し、その内の 1 個だけが次の核分裂反応を起こすときが臨界である。残余の 1.4 個は系外に放出されるか、系内で吸収される。

拡散方程式の一般解では、指数関数 $\exp(t/\tau)$ になり、核分裂反応の時間 t に対する増減を示す。こ

の時定数 τ について、 $\tau < 0$ のとき、反応数は時間と共に減衰し未臨界、 $\tau > 0$ のとき、急速に増大する超臨界に対応する。 τ の符号が変わる点が臨界に対応する。高純度の元素では未臨界から超臨界への移行は瞬間的である。例えば、純度 90% の ^{235}U の二つの未臨界の塊を用意し、これを急速に接近合体させた時に超臨界になるならば、核分裂連鎖がまさに指数関数的に拡大し爆裂する原子爆弾になる。

多くの元素とその同位体は、核分裂してから、次の中性子を放出するまでの固有の遅れ時間があり、これらは周期律表に記載されている。この遅れ時間には、短い方から数ナノ秒、ミリ秒、そして秒のオーダー、さらに時間、年・・・と様々な長さがある。数秒から数十秒程度の遅れ時間を持つ多元素を含む物質に、中性子を δ 関数的に入射すると、核分裂は、同時に起きるが、生じた新たな原子核から、中性子が放射されるまでに、時間的な遅れが生じる。この遅発中性子を発する元素を Precursor と呼ぶ。Precursor が存在する事で、未臨界から超臨界に移行するまでの時間が引き延ばされ、臨界状態を維持、操作する時間的な猶予が得られる[2]。

フェルミは、1942 年、Precursor を適度に含む ^{235}U – ^{238}U を核燃料として、世界で初めて制御された臨界核分裂実験に成功した。フェルミは、超臨界への増大は急速には起こらず、制御を手動で行う時間的余裕があることを理論上、確信していたが、理論に頼ることの危険性も良く認識しておられた。もし急速に核分裂反応が進行しそうになったならば、減速材を急速投入する。その手段として、炉の上部に減速材をロープで吊るした。その支索を斧でたたき切って減速材を落下させる、いささかアナログの方法だが、自ら斧を持って最前線に立っていたのである。まさに指揮官陣頭、その努力によって、人類は

原子力エネルギーの電力活用手段を学んだのである。彼は、相当強い中性子線を浴びたはずである。

彼の方法では、未臨界原子炉を起動するために、 δ 関数的に中性子を印加するのではなく、ステップ関数により階段状に、中性子数を増やしていった。この中性子源として、彼は、原子燃料が持っている自発中性子を使った。つまり、世界初の原子炉は、最初から超臨界を起こすに十分な量の核分裂物質を搭載し、余剰に発生する自発中性子を制御体で吸収して、強制的に未臨界にしてあった。制御棒を順次引き抜くことで、炉内の中性子数をステップ関数的に引き上げてゆく。そして、臨界に近づくにつれて、遅発中性子による時間遅れを見極めながら、引き抜き量を調節した。フェルミが一命を賭したこの方式は、原子炉の基本的スキームとして、今日の 100 万 kW 級の原子炉まで変わらず使われている。

幸いにして、チェルノブイリの誤操作を除けば、臨界状態で、超臨界事故は起きていない。それでも原子炉は、故障、事故、攻撃等で、制御棒が投入されなくなれば、超臨界に駆け上がってゆく危険がある。いずれにしても、何故、この様な超臨界になるポテンシャルがある方法を原子炉の基本スキームとして使い続けているのか？

- ・未臨界に燃料を搭載しておいて、外部から中性子を δ 関数的に印加する方法はなかったのか？
- ・答は簡単である。「1942 年には、未臨界状態を臨界に持って行くために必要な強度の中性子線源は、原子燃料でしか得られなかった」からである。（未臨界にしておいて、外部から、別のウラン燃料を挿入して臨界にもっていく方式もあったが、外部から機械的に重たい燃料棒を駆動する機構が必要であり、原子炉の内部に機械的な駆動機構を設ける事によるトラブルの危険性は本質的に同じである。）繰り返すが、絶対的な安全は、完全な未臨界炉でしか実現できない。しかし、未臨界炉には連鎖反応を励起するだけの中性子発生源がないので、原子炉は起動できない。即ち、動かない自動車と同じで安全であるが役には立たない。それで 1960 年代から、原子炉は常に超臨界搭載方式が続いているのである。

2. 核融合制御—未臨界原子炉の概念[3]

誰にでも、現在の Break-even 以下の核融合でも、その中性子を未臨界炉に追加したら、臨界に持って行けるのではという発想が浮かぶ筈である。しかし、何故か、誰も触らぬ神に祟りなしを決め込んでいる。

私たち核融合研究者は、核融合はきれいで核の平和利用に限定されると力説してきた。そのため、後ろ暗い原子力とは一線を劃す事が矜持とされていた。

しかし、愈々、核融合も実現の可能性を示すべき時期に来ており、理想主義ばかりを掲げてはいられなくなっている。冷静に核融合と核分裂を比較して見ると、放射化物の発生とその半減期には、大きな

差はない。しかも、その実現の暁には、トリチウム(三重水素)を 70 g 貯留する必要がある[4]。これは、福島第一の汚染水中のトリチウム(約 2 g[5])の 30 倍であり、実用の核融合炉ではその 10 倍以上になると予想される。

3. ミュオン核融合中性子源

ミュオン核融合は、プラズマを用いずに、原子核間距離を短縮、核融合反応を得る唯一の方法である。ミュオンと呼ばれる素粒子は、電子と同じ電荷を帯び、質量が 207 倍ある重い電子である。この素粒子が、重水素や三重水素ガス中に入射されると、その殻軌道の電子と置き換わる。質量が 207 倍あるので、その原子の基底殻の半径が $1/207$ の小さな原子になる。この小さなミュオン原子は、通常の電子を持つ原子と、非対称な分子を形成し、原子核間距離が接近、核融合が起きる確率が上がる。

東北大の物理化学の木野、山下他は、この重水素、三重水素、電子と負ミュオンの捕獲、励起、移行の過程について、四体の波動関数を精密に解くことに成功、その複雑な過程の反応率、分岐比を確定させた。この議論から、ミュオン核融合過程の各断面積が明らかになった。

私共は、この理論成果に基づいて、ミュオン原子の飛程を計算して、負ミュオンを打ち込む標的ガスの密度は $4 \times 10^{22} \text{ cm}^{-3}$ が必要であるとした。この標的中のミュオンの飛程は 0.2 mm 程度（磁場核融合の ITER では、イオンの平均自由行程(飛程)は数 m ある）。従って、ミュオン核融合は、炉心の寸法が 10^{-6} のオーダーである。これは、標的の密度が 10^6 倍だからであり、特に不思議ではない。拡散長が短い為、ミュオン核融合炉芯は、磁場や、慣性圧縮という大がかりな装置が不要、超音速気流中にマッハ衝撃波面として形成する鶏卵大の高圧ガス塊を炉心にする。

4. 中性子拡散モデルとマイクロ波

少ない外部中性子で、原子炉を効果的に制御する方法は？ ここに、原子炉とマイクロ波炉の基本的な共通点が浮かんでくる。

熱力学とマイクロ波の関係は、さまざまな形で論じられてきた。マイクロ波の電磁界が物質中の誘電率・透磁率の虚数部を介して、エネルギーを移行させていく。物質の空間的な不均一性のスケールが、波長に比べて十分に小さい時には、一様に加熱される。逆に電磁場の不均一性は、不均一加熱を起こす。これが一般的な理解である。しかし、非平衡熱力の泰斗プリゴジン[6]は、「不可逆過程は、熱力学力(Thermodynamic force)と熱力学流れ(Thermodynamic flow)を使って記述することが出来る。熱の流れの場合、 $dX=dQ$ 、すなわち時間 dt の間に流れる熱の量であり、物質の流れの場合は、

$dX=dN$ 、すなわち時間 dt の間に流れる物質質量(モル数)である。それぞれの場合、エントロピーの生成は、次式で表される。

$$d_i S = F dX \quad (2)$$

F は熱力学力であり、 $d_i S$ は“非補償的変換”によるエントロピー生成である。系全体のエントロピー dS は、次式で表される。

$$dS = d_e S + d_i S \quad (3)$$

ここで、 $d_e S$ は、外界との物質及びエネルギーの交換によるエントロピー変化である。これを中性子の流れに対応させて考えて見よう。少ない外部中性子の印加で、大きな中性子の流れを制御するには、その流れに中性子を付加するよりも、その流れを制御している中性子密度勾配を下げることに使えばいいのではないか？

Fig.1 の右図の様に、ブランケットの外側に中性子を入射する(外部中性子を系の外縁に加える)と、外縁で、局所的密度勾配が減少する。これは、拡散方程式の境界条件をフラックスではなく、勾配で与えることになる。中性子の流れは、密度勾配に比例するから、系内に留まる中性子の総数が増える。特に、内部に大量の核分裂発生がある系では効果が大きい。熱力学的には、核融合中性子に、非補償的変換、すなわち $d_i S$ という外部仕事をさせることになる。境界条件を空間微分で与える拡散方程式は、ノイマン問題としてよく知られている。

一方、Fig.1 の左の図は、原子炉の中心に外部中性子を入射するレイアウトである。中心部から放射中性子の幾何学的な射線は全て、ブランケットに吸収されるから、ブランケット中の中性子量が増大すると考えられる。その直感はまちがっている。まず、炉中心の中性子密度 N_0 が増え、半径方向の密度勾配 dN/dr が急峻になり、密度勾配の増加は、外側に向かう流れを増大させる。元々ブランケットの中にあつた中性子も含めて、外向きの流れが強くなるので、その積分量(系内の中性子の総量)は殆ど増えないか、寧ろ減少する。

この様に、中性子を温度と熱流に置き換えると、内部に中性子の発生を伴う原子炉も、発熱を伴うマイクロ波炉にも、共通の熱力学が適用出来る。

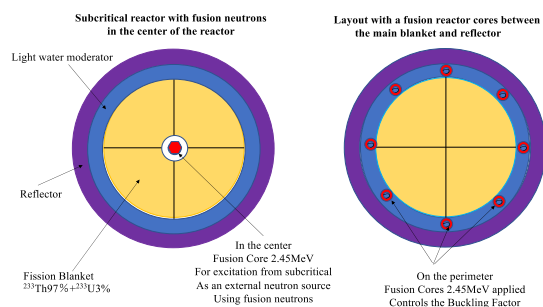


Fig.1 Relative arrangements of fusion neutron core(s) and fission blanket (left) fusion core in the center (right)

Fusion cores on the perimeter. [Ref. [3] Fig.5 を転載]

5. 実在した原子炉に適用すると

原子炉のように、事故を起こすと大変な相手に、ゼロから新しい設計を起こすのはとても大変であるし、その設計の妥当性を証明する手立てもない。

技術は、先人の歩みをフォローして伸びていく。Shippingport Atomic Station は、米国ペンシルバニア州に建設された、世界で始めて商業運転に成功した原子炉で、Th (トリウム) 燃料を搭載した PWR (加圧水型炉) である。可動式中心部は、上下に動く movable seed blanket 方式であり、初期状態 (Front) で ^{232}Th が 5000 Kg と ^{233}U が 200 kg (核燃料 4.0 %) が架装されていた。その外周を覆う固定ブランケット Stationary Blanket には、それぞれ 17700 kg 及び 300 kg (1.7 %) が搭載されていた。

^{233}U の比放射能(自発中性子の発生量)は、 3.58×10^8 Bq/g である。従って、この原子炉のシードブランケット中の ^{233}U から放射される自発中性子数は 7×10^{13} Bq(回/s) である。この自発中性子のあるシードブランケットを固定ブランケットに同軸状に挿入すると、両者合わせて、臨界まで立ち上げられる。この原子炉は、電気出力 64 MW (熱出力 240 MW_{thermal}) を安定して発生させた。

$^{232}\text{Th} - ^{233}\text{U}$ 系では、1 回の核分裂でおよそ 200 MeV のエネルギーが放出され、核分裂回数は、 2×10^{20} Bq になる。シードブランケットはこの内 40 % を担っており、その中で核分裂回数は約 8×10^{19} Bq で、その中性子量は、自発核分裂数の約 1.1×10^6 倍である。この様な大量の中性子量を生み出し、且つ、臨界を保って運転される。遅発中性子の作用により、即発臨界に至る時間尤度(安定領域から逸脱する時間的余裕)数十秒が与えられ、この玉乗りのような準安定状態が成立する。

米国 DOE は、この原子炉の全資料を公開している。核燃料の成分・材質、燃料細管の構造と配置、燃焼度等の数値情報、詳細図面と写真、全運転履歴である。我々は、この固体トリウム軽水増殖炉をスパコン上に構築し、実験結果を再現するプログラムを作る。このプログラム上に、熱力学的不可逆過程 $d_i S$ を与える外部核融合中性子源を置く。

無限大に広がった一様な核分裂物質中の増倍率は、その境界から失われる高速中性子も熱中性子もゼロであり k_{∞} と書く。有限な境界を有する時、高速中性子と熱中性子が境界から散逸するので、実効増倍率は、次式となる。

$$k_{eff} = k_{\infty} \times P_F \times P_T \quad (4)$$

ここで P_F 、 P_T は高速及び熱中性子が逃げない確率で、前節のように $d_i S$ によって造り出される。外周付近の中性子数を増やすことで、密度勾配が低下する。中性子フラックスは密度勾配に比例するから、中性子が炉外に逃げない確率 P_F 、 P_T 上がる。炉心

に正の反応度を加え、実効増倍率を上げることに等価であると考えられる。原子炉の用語で、バックリングを変えると云うこと。中性子の逃げない確率の操作は、繰り返すが、 d_0S の投入が関係する。

これに対し、超臨界状態の炉に於ける制御棒の役割は「負の反応因子」の投入により、炉内の中性子数を減らして、核分裂反応を抑える。引き抜いて中性子量を増やす。これは直接の中性子量の変更であり d_0S の操作であって、非補償的作用ではない。なお、核分裂によって発生する第一世代の中性子には化学反応に因る親和力と云う概念を適用でき、 d_0S である。核分裂固有の連鎖反応は、爆発と同じで、熱力学上の平衡、準平衡概念の適用外と考えている。諸兄のご意見、ご批判を期待している。

6. フェルミ寿命 レサジーと云う概念

中性子エネルギーの時間・空間変化のスケール、即ちフェルミ寿命、レサジーというような定常運転を前提とした概念を非平衡過程へ拡張したい。

未臨界炉では、炉全体の反応を支える余剰なエネルギーはない。外部中性子の入射周りの部分的な核分裂反応の促進は、大きな背景の中で緩和されだけである。従って、局所入射によって中性密度勾配の制御が可能である。これは、プリゴジンの唱えた「熱力学的に平衡でない散逸構造」、あるいは「定常散逸系の議論」の原子炉物理への拡張なのである。

核融合、核分裂の研究者は、熱力学のような古典的多粒子系には興味がないのだが、核融合で、核分裂を制御するとなると、プリゴジンの散逸系熱力学の考え方が必要である。フェルミやプリゴジンという大先達が、核融合について知識を共有する時代だったならば、別の未臨界原子炉物理が誕生していたかもしれない。しかし、散逸系の熱力学を基本とする核融合と核分裂ハイブリッド炉については、さすがのプリゴジンも言及していない。

従来の定常運転を前提とした超臨界原子炉では、中性子密度の急激な変化は、全体に及ぶ最も危険な兆候である。これは、超臨界炉においては、元々、炉内の中性子は超臨界まで搭載されているので、局所的な反応度の上昇は、炉全体に波及する不安定性として、極めて危険なインシデントだからである。

制御は、遅発中性子の遅れ要素 β よりも反応度 ρ の方が小さい $\beta > \rho$ の場合でのみ有効であり、数秒から数十秒の間に、ロッドドロップなどの手法で、中性子数を急激に下げる緊急停止を行う。フェルミの斧から、何も変わっていない。

補遺

1. 本文中でも述べた様に、Pu やマイナーアクチニドを発生させない、きれいな原子炉を目差す。故に、原子炉燃料は、現在の原子炉が使っている ^{238}U – ^{235}U –

^{239}Pu 系列の燃料は用いず、代わりに、トリチウムを親核とする ^{232}Th – ^{233}U 系列のきれいな原子炉を建設する。

2. トリウム酸化物は、3000 °Cの高融点で、難焼結性である、通常の方法では、精度良く安価に燃料ペレットを製作できない。そこで、我々はマイクロ波によるニアネット焼成技術を投入していく。

3. 本格的に核融合-核分裂ハイブリッド炉を作るには、少なくとも、医療用重粒子線加速器規模を、建設しなければならない。そこで、我々は、加速器開発と並行して、大がかりな加速器が不要な IEC (慣性静電閉じこめ核融合)を活用し、予備実験を実施したい。この核融合と核分裂のモジュールを用い、ハイブリッド炉の非平衡過程を実証する実証実験と、スパコンによる理論の精緻化を急ぐ。

謝辞

望外の第1回 JEMEA 学術功績賞を戴き、さらに本項執筆の機会まで頂いた。日本電磁波エネルギー応用学会 JEMEA の皆様に、厚く御礼申し上げます。

また、非補償的变化の概念をマイクロ波過程に持ち込むことを提唱され、コロナ禍の最中に、ZOOM による輪講を一年半に渡り御指導下さりました東京工業大学名誉教授 永田和宏先生に深甚なる謝意を捧げます。先生のお力が無ければ、原子炉物理に非補償の変換を持ち込むという発想は生まれません。研究は緒に就いたばかりですが、もし、成功すれば、日本のエネルギー問題を根本から変えることになるでしょう。永田先生にもう一度、御礼申し上げます。また、このテーマは、中谷伸氏との共同研究により進められています。

参考文献

- [1] R.Murray, Nuclear Engineering, 2nd edition, (1961) Prentice-Hall.
- [2] 平川直弘、岩崎智彦、“原子炉物理入門”東北大学出版会 (2003)、pp. 150~169.
- [3] A. Iiyoshi, N. Kobayashi, T. Mutoh, S. Nakatani, S. Okada, M. Sato*, H. Takano, Y. Tanahashi, N. Yamamoto, A. Fujita, and Y. Kino, “A Safer, Smaller, Cleaner Subcritical Thorium Fission—Muonic Fusion Hybrid Reactor “Fusion Science and Technology, (2013), DOI: <https://doi.org/10.1080/15361055.2023.2204996>
- [4] 磯部 兼嗣, 岩井 保則,” 核融合トリチウム研究最前線” 日本原子力学会誌, Vol.61, No.2 (2019) pp. 138-142.
- [5] 資源エネルギー庁: <https://www.enecho.meti.go.jp/about/special/shared/img/799pu-2jz55hj8.png>
- [6] I. Prigogine, D. Kondepudi, 瀬能学・岩本和敏訳: 現代熱力学 (1999) 朝倉書店、Chap.3, pp. 64-66, 88.
- [7] I. Prigogine, The End of Certainty -Time, Chaos, and the New Laws of Nature, The Free Press, New York (1997) ISBN 0-684-83705-6