連載
講座

高速炉の変遷と現状

第1回 高速炉の誕生

日本原子力研究開発機構 柳澤 務, 田辺 裕美

I. はじめに

高速増殖炉は、高速の中性子を核分裂に用いることにより、炉内において消費した以上の核燃料の増殖を可能とするものである。昨今の石油価格の高騰や地球温暖化防止のためのCO₂排出抑制の観点から、原子力発電が見直されつつある。しかしながら、ウラン235のような核分裂性ウランを主に用いるこれまでのような利用法を続けた場合、ウラン資源の潜在的埋蔵量は、石炭はいうに及ばず、枯渇の危機が叫ばれている石油と比べても決して大きいわけではない。したがって、ウラン238のような非核分裂性物質も燃料として活用できる高速炉^{a)}に対して原子力発電炉の本命としての期待もますます膨らんできている。また使用済み燃料を再処理し、プルトニウムばかりでなくその他の超ウラン元素(TRU)を回収して利用する高速炉サイクルが実現すれば、高レベル廃棄物発生量を減らすなど地球環境への負担を軽減できる可能性も大きく期待されている。そこで今回から8回にわたって、高速炉の誕生や、炉型式の変遷、海外と国内の開発状況、今後の開発課題や開発計画を見ていく。第1回は、核分裂の発見から連鎖反応の確認および高速炉の誕生について述べる。

II. 黎明期

1. 核分裂反応の発見

イタリアの物理学者エンリコ・フェルミ(1901~54)は、電荷を持たない中性子は陽子や電子の反発を受けることなく比較的容易に原子核に当てることができることに気づき、1934年以降、中性子を水素のような軽いものからウランのような重いものまで多くの原子核に当てて

いろいろな反応を得ることができた。なかでもウランの場合は中性子を当てた後、強い放射線とともに比較的軽い物質が生成されることがわかったが、当初はそれが何を意味するものかわからなかった。オットー・ハーン(1879~1968)は、中性子のウランへの衝突の結果生じた物質の中に質量数がウランの半分強のバリウムが生成されていることを見出し、リーゼ・マイトナー(1873~1968)の理論的な裏づけも得て、1939年頃にこれがウラン原子核の分裂によるものであるとの結論を出した。

その後、欧州をはじめ米国や日本の核物理学者や化学者の間で同様の研究が盛んに行われ、ウランの核分裂についていろいろなことがわかってきた。天然ウランには0.7%のウラン235とそれ以外のウラン238が含まれており、中性子を当てて核分裂を起こすのは主に235の方であり、また中性子の速度が遅いほうが核分裂を起こしやすいこと、一定値以上高速の中性子を当てた場合にはウラン238でも核分裂を起こすこと、また核分裂と同時に2~3個の中性子が放出されるが、高速中性子を当てた場合のほうが1回の核分裂当りに放出される中性子の数が若干増えることなどもわかってきた。

2. プルトニウムの発見

米国では、1940年にエドウィン・マクミラン(1907~91)が原子番号92番のウランに中性子を当てて核分裂生成物の測定を行っていた際に、他と異なる性質を持った放射性物質を見出した。これがフェルミの予言していたウランを超える第93番目の元素であり、太陽系の天王星(ウラヌス)の外側を回っている海王星(ネプチューン)にちなんでネプツニウムと名づけた。さらにその後を引き継いだ同僚のグレン・シーボーグ(1912~99)(第1図)らは、翌年に加速器を用いて発生させた中性子をパラフィンを通して減速させた上で天然ウランに照射するという方法で94番目の元素を見つけ、冥王星(プルート)にちなんでプルトニウムと名づけた。これはウラン238が中性子1個を吸収した後に β 崩壊を2度繰り返してプルトニウム239に転換したものである。生成される量が極めて微量であることから分析は困難を極めたが、シーボーグらは1kgのウランに中性子を照射して0.5 μ gの

Fast Breeder Reactor: the Past, the Present and the Future
—(1) The Birth of the Fast Breeder Reactor: Tsutomu YANAGISAWA, Hiromi TANABE.

(2007年 3月2日 受理)

^{a)} 高速炉とは通常、高速増殖炉の略称としても、また必ずしも増殖を目的としない高速中性子炉の略称としても用いられ得るが、本稿では本来の開発目的に適った高速増殖炉を指すものとする。

第1図 グレン・シーボーグ 出典：文献1)

プルトニウムを得ることができた。これが人類が最初に生産したプルトニウムといえる。さらにシーボーグらは同年3月に、このプルトニウムに中性子を当てるとウラン235よりもさらに容易に核分裂を起こすことを見出した。この発見がこの後の高速炉の開発へとつながっていくことになる。

3. 最初の連鎖反応の実証実験 CP-1

1回の核分裂反応が発生するエネルギーは計算によって比較的容易に約200 MeVと求められ、これまでの化学反応の放出エネルギーとは比較にならないほど大きいことがわかった。また、ウラン原子核の1回の核分裂の際に放出される2～3個の中性子のうちの1個以上をさらに別のウラン原子核に当てることにより、核分裂が次々に継続(連鎖反応)して膨大なエネルギーが取り出せる可能性に少なからぬ科学者が気付いた。極めて残念なことではあるが、その膨大なエネルギーの利用の道として、当初は平和目的ではなく兵器開発の研究が先行する

こととなった。

フェルミらはシカゴ大学のフットボールスタジアムの下のスクウォッシュ用コートに約50トンの天然ウランと約500トンの黒鉛ブロックなどからなる原子炉CP-1(シカゴ・パイル1号)を組み上げて臨界実験を行った。1942年12月2日午後3時過ぎにカドミウム製の制御棒を15 cm ずつ引き出していくと、数回目に中性子カウントの指数関数的な上昇が確認された(第2図の記録紙は中性子の強度を示しており、最も右側のピークが連鎖反応に到達したことによる上昇と制御棒挿入による降下に対応している)。これによりフェルミらは史上初めて核分裂連鎖反応を実証して見せたのである。この研究自体は一連の原子爆弾製造計画の中で行われたものであり、この後、米国政府の強力な管理の下にマンハッタン計画へと発展し、広島、長崎の原子爆弾投下へと不幸な形に具体化していったのである。しかしながら、後から見ればこのフェルミらの実験は核分裂の連鎖反応を穏やかに制御できることを実証したという意味で、原子力エネルギーの平和利用のためにも重要な一歩であったといえる。

Ⅲ. 原子力エネルギーの平和利用へ

米国のアイゼンハワー大統領は1953年の国連総会で「Atoms for Peace」と題して原子力の平和利用を推進する方策を打ち出す演説を行った。これを受けて、米国や欧州の工業先進国を中心に原子力平和利用への期待が膨らんできた。このような中で、1957年には平和利用を進める国際的な協力の体制整備を目的として国際原子力機関(IAEA)が設立された。

原子力の平和利用には、RI(ラジオアイソトープ)の生産や、農業、医学への利用など幅広い適用分野があるが、膨大な原子力エネルギーを動力に利用する原子力発電が最も効果的な活用法といえる。このため、米国、欧

第2図 CP-1の臨界を示す記録紙 出典：文献1)

州を中心に発電用原子炉として多様な型式の検討と設計が行われることとなった。

1. 動力用原子炉の原理

原子力を発電など民生用に用いるためには、核分裂反応を制御しながらそのエネルギーを徐々に取り出す必要がある。これはまさにフェルミらが1941年に実証して見せたように、原子炉を臨界条件において穏やかな原子核分裂連鎖反応を継続することであり、後はその際に発生する熱を取り出して発電等に利用すればよいことになる。原子炉にはいろいろな型のものが考えられるが、主に核分裂に用いられる中性子のエネルギーという観点からは、大きく熱中性子炉と高速中性子炉とに分類することができる。

(1) 熱中性子炉

高速中性子より低速中性子(熱中性子)のほうがウラン235の核分裂を起こしやすいことから、熱中性子を用いるほうが比較的容易に臨界を維持することができる。そのためには核分裂で発生した高速中性子を衝突させてその速度を遅くするための減速材が必要となる。減速材としては最も軽い水素原子核を多量に含む普通の水(軽水)が減速効果が大きいという扱いやすく、また冷却材としての優れた効果もあわせ持っている。しかし水素原子核は中性子を吸収(無駄食い)しやすいため、減速材として軽水を用いる場合には、燃料としては核分裂性のウラン235の割合を高めた濃縮ウランを用いる必要がある。したがって濃縮ウランが入手できる場合には減速材として軽水を使うことが可能であるが、濃縮技術が未開発などの事情で天然ウランしか入手できない場合には、減速材として軽水よりも中性子が無駄食いをしない重水や黒鉛を用いる必要がある。このようにして、発電用原子炉として軽水炉、重水炉、黒鉛炉などのアイデアが生まれた。これらはすべて中性子を減速して用いることから熱中性子炉と呼ぶことができる。米国は主に軽水炉の開発を進め、旧ソ連や英国では黒鉛炉の開発が行われた。

(2) 増殖の原理と高速中性子炉

(a) 増殖の原理

原子炉を臨界に導いて熱を取り出すだけにとどまらず、さらに消費した以上の燃料を生産しようという目的で考えられたのが増殖炉である。原子力の開発利用を始めた当初からウラン資源の有限性と偏在性が懸念されており、核分裂性のウラン235を用いるのみでは、早晚、資源枯渇のおそれがあることからその対策が必要と考えられていた。このため、天然ウラン中に大量に含まれるウラン238をプルトニウム239に変えて燃料として活用する方法が検討された。核分裂の際に放出される2~3個の中性子のうち1個は連鎖反応維持のため次の核分裂反応に使われるので、さらに1個強の中性子をウラン238に吸収させて、プルトニウム239に転換させることがで

ければ、原子力エネルギーで発電しながら消費した以上の燃料を生成(すなわち、増殖)することができる。またウラン238のほかにも自然界に存在するトリウム232は中性子を1個吸収した後、2回の β 崩壊を経て核分裂性のウラン233に転換するので、同様に増殖炉の燃料となりうる。ウラン233、ウラン235、プルトニウム239などのように、中性子を受けて直ちに核分裂を起こすものを核分裂性物質と呼び、トリウム232やウラン238のように核分裂性物質のもとになりうるものを親物質と呼ぶ。

(b) 高速中性子の活用

上述のとおり、熱中性子よりも高速中性子による核分裂のほうが放出される中性子数が多いことおよび高速中性子によるウラン238自身の核分裂も期待できることなどから、増殖を成立させるためには熱中性子よりも高速中性子を直接用いるほうが有利となる。実際には炉心から漏れ出る中性子や構造材などに無駄食いされる中性子もあるので、増殖が成立するためには中性子再生率 η (1個の中性子が燃料の原子核に吸収された際に発生する核分裂中性子の個数)の値が2より十分大きくなければ話にならない。主な核分裂物質に対する η の値は、第3図に示すように、一般に高速中性子スペクトルに対して大きな値を示し、特にプルトニウム239は η の値が3に近く、増殖に最も適した燃料といえる。このように増殖を目的として高速中性子を用いる原子炉を高速増殖炉(略して、単に高速炉と呼ぶ。なおウラン233の熱中性子に対する η の値は2.3程度と比較的大きいので、トリウム232を親物質として用いる場合には高速増殖炉とともに熱中性子増殖炉の概念も考えられる。

2. 高速炉の特徴

(1) 軽水炉との比較

第1表に高速炉と軽水炉の比較を示す。高速炉では核分裂に主として寄与する中性子のエネルギーや燃料(軽水炉の濃縮ウランに対してプルトニウム・ウラン混合燃料)が軽水炉と異なる。さらに、高速炉では減速材は不要であるばかりか、中性子をできるだけ減速させないために適切な冷却材の選択が重要であり、水素を含む軽水などよりもっと重い原子核を持つ物質が望ましい。このようにして、伝熱特性にも優れたナトリウム(Na)やナック(NaK)、水銀、鉛などの液体金属が冷却材として選択された。中でもナトリウムは低密度で流動特性にも優れており、最適とされている。一方、冷却材としてガス(HeおよびCO₂)や水蒸気を用いるアイデアもある。これらは比較的軽い原子核であるとともに減速を起こす原子核(H, C)を含んでいるが、密度が低く、減速効果が小さいことから増殖炉に用いることも可能である。

(2) その他の特徴

原子炉の中で消費される核分裂性物質の量に対して燃料中の親物質から生成される核分裂性物質の量の比を転

第3図 中性子エネルギーと中性子再生率 η の関係 出典:文献2)

第1表 高速炉と軽水炉の比較

項目	高速炉	軽水炉
主に核分裂に寄与する中性子	高速中性子	熱中性子
燃料	プルトニウムと劣化ウランの混合燃料	3～5%濃縮ウラン
減速材	なし	軽水
代表的な冷却材	ナトリウム	軽水
転換比	1.0～1.2	約0.6

換比(特に1より大きい場合には増殖比)と呼ぶが、転換比は原子炉の燃料、炉内構造物など炉心構成要素の材料や配置等を適切に選定することにより変えることができる。このことは、炉心設計によって増殖ではなくプルトニウムを積極的に燃焼(消費)することも可能であることを意味する。すなわち、必要に応じて増殖炉としてもプルトニウム燃焼炉としても機能できることは高速炉の特長といえる。また原子炉の中ではウランやプルトニウムが中性子を吸収し(核分裂せずに)、ネプツニウムやアメリシウム、キュリウムなどの超ウラン元素(TRU)が一定の割合で生成される。これらは熱中性子が支配的な軽水炉の炉心では燃焼しにくいので、軽水炉の使用済燃料の再処理では回収せずに高レベル放射性廃棄物として処理される。しかし高速中性子が支配的な高速炉では、超ウラン元素もよく燃焼するので、プルトニウムとともにリサイクルして燃料として用いることにより放射性廃棄物処分の負担を軽減することができる。

Ⅳ. 高速炉の誕生

1951年12月20日、米国アイダホ州のアルコでは前日までと同じように原子炉が立ち上げられたが、この日はいつもと少し様子が違っていた。原子炉がフルパワーに達した後、一人がスイッチをひねると発電機からの電気が建屋の照明系に接続され、200 W の電球4個が明々と灯った(第4、5図)。この原子炉こそ、米国が終戦後本格的に乗り出した高速炉の開発の第1段階を飾る高速増殖実験炉 EBR-I であり、この日の発電は史上初の原子力発電の成功という大偉業となった。しかし EBR-I の

第4図 発電により灯された EBR-I 建屋内の電灯 出典:文献6)

第5図 EBR-Iに携わった研究者たち 出典:文献6)

詳細に移る前に、それに先立つ1946年に臨界を達成した高速中性子炉のことも触れておく必要がある。

1. クレメンタイン炉

米国はプルトニウム燃料の適性や炉の制御性、増殖性についての基礎データを得るために、1946年、ロスアラモス国立研究所にクレメンタインと名づけた小型の原子炉(熱出力25 kW)を建設した。第2表に主要諸元を示すとおり、この炉は金属プルトニウムを燃料とする世界最初の原子炉であり、また冷却材として水銀を用いた液体金属冷却高速中性子炉であった。また制御棒にはウランを詰めて、正の反応度を加減して制御する方式としたのも特徴である。同炉は1946年8月11日に臨界、さらに1949年3月には設計出力25 kWに到達し、いろいろな物質の原子核の高速中性子に対する各種断面積等の貴重な核データを提供するとともに、燃料破損などの課題を明らかにして1952年12月に運転を終えた。クレメンタイン炉は主に核兵器開発に必要なデータを取得する目的で

第2表 クレメンタイン炉の主要諸元 出典:文献5)

熱出力	25 kW
電気出力(kW)	発電せず
原子炉出入口温度	121/38℃
冷却材(1次系/2次系)	水銀/水
燃料/被覆材	Pu/Ni
炉心直径/高さ	15.0/14.0(cm)
燃料ピン径/肉厚	16.4/0.508 mm
反応度制御方式	U 反射体
安全棒	^{10}B ピストン

作られた高速中性子炉であったが、この後、本格化する発電用高速炉開発にとっても重要な多くの知識と経験を提供することとなった。ちなみにクレメンタインという炉の名前の由来は、プルトニウムのコードNo.が49(原子番号:94,質量数:239)であることから、ゴールドラッシュ時(1849年~)にカリフォルニアに殺到した金採鉱者たち(49'erと呼ばれた)の愛唱歌である「愛しのクレメンタイン」からの発想とされている。

2. EBR-I 炉

高速炉を軽水炉とともに原子力エネルギー利用の主要な柱と位置づけた米国は、クレメンタイン炉の経験を踏まえて、最初的高速増殖実験炉 EBR-I をアイダホ州に建設した。EBR-I は将来、発電用高速炉を実用化するために、高速炉の炉物理特性や燃料の増殖特性、さらに冷却材に用いる液体金属の技術を研究することを目的とした実験炉として位置づけられた。EBR-I の設計を任されたのは、CP-1の実験にも参加したウォルター・ジン(1907~2000)であった。さらにフェルミもアドバイザーとして関わった。

EBR-I (熱出力1 MW, 電気出力200 kW)の設計に当ってはクレメンタイン炉からいくつかの重要な変更がなされた。冷却材は水銀に代わってナトリウムとカリウムの合金 NaK が用いられた。ナトリウムでなく NaK が用いられたのは、常温で液体である点が融点約98℃のナトリウムより有利と当時考えられたためである。また当時は NaK 等液体金属の性状に関する情報や取扱経験がほとんどなく、制御棒を NaK 中で問題なく挿入できるか不安があったため、第6図に示すように、制御棒は炉容器の外側に置かれた外部ブランケット内を出し入れする方法が採られた。燃料は当初濃縮された金属ウランが用いられ、1962年の第4炉心以降、主に金属プルトニウムが用いられた。主要諸元を第3表に示す。

第6図 EBR-I 炉心のカットビュー 出典:文献5)

第3表 EBR-I の主要諸元(主に第I炉心) 出典:文献5)

熱出力	1,000 kW
電気出力	200 kW
原子炉出入口温度	322/230℃
冷却材(1次系/2次系)	NaK/NaK
蒸気温度	276℃
燃料(第I～III炉心)	濃縮 U
燃料(第IV, V炉心)	Pu
燃料ピン径/肉厚	9.24/1.07 mm
被覆材	347 SS
内部ブランケット冷却	NaK
外部ブランケット冷却	空気
制御棒/安全棒	4/8本
制御棒(安全棒)素材	天然 U/SS

EBR-I の建設は1949年に開始され、燃料の補充や再加工を行った後、1951年8月24日に臨界に達した。そして上述の12月20日を迎えることとなったのである。高速炉以外の原子炉による発電は1954年に旧ソ連が黒鉛減速のオブニンスク炉を用いて行ったのが最初とされており、米国ではやや遅れて1957年に加圧水型軽水炉の Shippingport 発電所を完成させて発電を行った。したがって小規模とはいえ高速炉による発電がこれらに数年先行して成功したことの意義は大きい。さらに重要な成果といえるのが、EBR-I の第1炉心での運転(1951～53年)において燃料の増殖比が 1.01 ± 0.05 と確認されたことである。

EBR-I で得られた成果の中でも代表的なものとしては次の3点を挙げることができる。

- (1) 高速炉が熱中性子炉と同様に制御可能であることを実証したこと。
- (2) 冷却材としての液体金属の実用性を示したこと。
- (3) 増殖が理論だけでなく現実に可能であることを実証したこと。

また EBR-I は1955年にミス・オペレーションから燃料溶融事故を起こしたが、これもその後の高速炉開発にとって貴重な教訓と知見を提供した。

V. 結 び に

1930年代に一気に高まった原子核物理学分野への情熱は、数々の歴史的な発見を経たのち山積した技術面での

難問も突破してわずか10数年後には高速炉の臨界ならびに増殖と発電の両立という形で結実したのである。これにより、ほぼ無尽蔵に近い原子力エネルギーを人類が入手できる可能性を現実のものとして捉えることができるようになった。EBR-I はこのように高速炉の開発によって多大な貢献をなし1964年にその役目を終えたが、米国ではこれらの成果に基づいてその後 EBR-II, エンリコ・フェルミ炉が建設され、世界の初期の高速炉開発をリードしていった。また、米国以外でも英国のドンレイ高速炉(DFR)が1959年に臨界になるなど欧州各国や日本がこれに続くことになるが、これらについては次号以降に詳述する。

— 参 考 資 料 —

- 1) 日本原子力学会編, 原子力がひらく世紀, (1998).
- 2) W. Marshall, Nuclear Power Technology—Vol.1: Reactor Technology, Clarendon Press, (1983).
- 3) M.E. Bunker, Early Reactors—From Fermi's Water Boiler to Novel Power Prototypes, Los Alamos Science, (1983).
- 4) 中川 弘, 他, “世界の高速実験炉運転経験の評価, (IV); EBR-I の運転経験”, 日本原子力学会誌, 11[10], 626, (1969).
- 5) J.G. Yevick, *et al.*, Fast Reactor Technology: Plant Design, MIT Press, (1966).
- 6) L. Walters, “Fifty Years of Nuclear Energy,” 3rd Tsuruga Energy Forum, (2002).

著 者 紹 介

柳澤 務(やなぎさわ・つとむ)

日本原子力研究開発機構
(専門分野/関心分野) 高速増殖炉サイクル
の研究開発, 原子炉廃止措置の研究開発

田辺裕美(たなべ・ひろみ)

日本原子力研究開発機構 FBR 研究開発センター
(専門分野) 高速炉のナトリウム等に関わる
安全性研究