

Fast Breeder Reactor Programs: History and Status (Research Report of the Int. Panel on Fissile Materials (2010/02))

概観： プルトニウム増殖炉の盛衰 (F. Hippel)

Pu 増殖炉： 第 2 次世界大戦中に US で概念が生まれた。ウラン資源の枯渇が Pu 増殖によって避けられると考えられ、ソ連、イギリス、フランス、ドイツ、日本、インドが Pu 増殖炉計画（ベルギー、イタリア、オランダはフランスとドイツの計画に参加）。

1980 年代後半から原子力発電が低調になり（現在の原発容量は 1970 年代初頭の～1/10）、高速増殖炉の喫緊性は OECD 圏内では薄らいでいる一方で、軽水炉から出てくる Pu（標準的な使用済み燃料中に～1%の Pu がある）と超ウラン元素を燃焼させる“燃焼炉”としてのニーズが生まれている。

インド・ロシアではウラン不足が懸念されて、実証炉が建設されている。中国はロシア設計の増殖炉を 2 基建設中。

補足 (by ITO)

1. 中国の高速炉の開発状況

中国の高速増殖炉の開発は、中国の国家科学技術委員会が管理する高技術研究発展計画の中のエネルギー技術分野の課題の一つとして 1987 年に組み込まれて、北京から 40km 離れている原子能科学研究院高速炉研究センターで進められている。中国は高速炉にプルトニウム燃焼炉の役割をまず与え、増殖炉としての実証は長期的観点で考えている。

2008 年末までのデータによると、中国が稼動している原子力発電所の出力は約 9.1GWe、すでに建設を始めている原発の出力は約 11.3GWe、建設を承認されている原発の出力は約 23.9GWe、初段階の業務開始を承認されている原発の出力は約 19.3GWe で、合計約 63.6GWe になる。現在の成長状況から見ると、中国における原子力発電の中長期発展計画に提示された、2020 年時点での建設済み原発出力 40GWe、建設中の原発出力 18GWe という目標は必ず上回って達成されよう。中国工程院が 2005 年に出した予測では、2050 年の中国の発電総出力は約 1650GWe になり、原子力発電による出力は 250GWe で、原子力発電は約 16%を占めるようになる。中国の原子力発電には大きな将来性がある。原子力発電の大規模な成長には、ウラン資源の確保と長寿命の放射性廃棄物の安全な処理といった問題が生じるが、高速炉技術とクローズド核燃料サイクル技術は、この 2 つの主要問題を解決するために最も現実的で実行可能な手段である。

中国のウラン資源の探査と開発を強化し、外国からの一部ウラン資源輸入を補助手段とし、加圧水型原子炉と高速炉を組み合わせることで発展させたクローズド核燃料サイクル方式を採用することにより、中国は原発の出力規模を 2050 年には 250GWe に到達させるという目標を実現できるとしている。

(Science Portal China, 周培徳 (中国原子能科学研究院高速炉工程部副総工師) 2009/4/28)

実験炉以降の計画については、実験炉の成果を踏まえて検討されることになるが、2020年頃 600MWe の原型炉（CPFR）完成、2025年頃 1000MWe 規模の実証炉完成というステップを予定している。[高速増殖炉を巡っては、ロシア国営のアトムストロイエクスポルトが 2009/10 月、中国原子能工業ならびに中国原子能研究所との間で 800MWe の実証炉 BN800 の中国供給に関して、設計の前段階に当たる作業の実施で合意。覚書を締結している。]

なぜ増殖炉の商用化は失敗したのか

増殖炉が必要である理由として以下のことが云われてきた：

1. ウラン資源は少なく、核分裂利用が広範になると高品質ウランは不足するだろう。
2. 増殖炉はその内直ぐに軽水炉発電と経済的に競合するようになるだろう。
3. 増殖炉は軽水炉と同じくらい安全性と信頼性が高まるだろう。
4. 増殖炉と燃料サイクルが持つ核拡散リスクは解決できるだろう。

これらは全部誤りである。

	MWe	MWt	Operation
France			
Rapsodie		40	1967-83
Phénix	250		1973-2009
Superphénix	1240		1985-98
India			
FBTR		40	1985-
PFBR	500		2010?
Japan			
Joyo		140	1977-
Monju	280		1994-95, 2010?
USSR/Russia			
BR-5		5	1959-2004
BOR-60	12		1969-

	MWe	MWt	Operation
USSR/Russia (cont.)			
BN-350 (Kazakhstan)	350		1972-99
BN-600	600		1980-
BN-800	800		2014?
United Kingdom			
DFR	15		1959-77
PFR	250		1974-94
United States			
EBR-I	0.2		1951-63
EBR-II	20		1963-94
Fermi 1	66		1963-72
SEFOR		20	1969-72
Fast Flux Test Facility		400	1980-93

Table 1.1 Major experimental, pilot and demonstration fast breeder reactors.¹

1. ウランは安くて豊富にある

原子力発電のためのウラン需要は 67,000 metric Ton¹（2007 年）。IAEA は今後世界の原子力発電容量が増え、2030 年のウラン需要は 94,000~122,000 Ton/Y と見積もっている。

\$130/kg 以下で採取できる量ウランの埋蔵量は 4.7MTon → 5.5MTon に増えている。今後 27 カ国における探査でこの価格帯のウランは更に 7.6MTon 発見されるだろう（OECD の 2007 見積もり）。長期的かつ世界的に見ればさらに多くのウランがあるだろう。地質学的に妥当なある推定によれば、\$130/kg までの価格で採取できるウランは更に 50~126MTon ある。これは 2030 年の需要見込みの 500~100 倍である。

スポット相場のウラン価格は 1970 年代後半と 2005 年以降 \$130/kg を大きく超えたが、需要と供給にアンバランスがあったこの 2 つの期間を除け

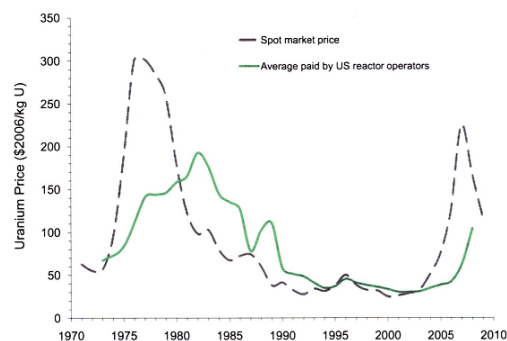


Figure 1.2 History of the price of uranium since 1970.¹⁰

¹ 基礎データ： ~180 Ton/GWe・Y のウランが必要

ば、価格は\$50/kg以下であった。1970年代の価格ピークは原子力発電が急速に伸びるという期待によるものだったが、これは実現せずにウランが滞貨して次の10年間安売りされて、多くのウラン鉱山が閉鎖された。冷戦時の核兵器が余って生じた旧ソ連の兵器級ウラニウム500Tonをブレンドし直した低濃縮ウランがUSに売却されてUSの原子力発電容量の半分を満たしたことも、新たにウランを採掘する必要性を遅らせた。このロシアブレンドウランは2013年に終了し、また天然ウランの在庫もほぼ消費し尽くされようとしている。ごく最近のウラン価格高騰の原因の一つは、ウラン鉱山の生産能力が再開される前にウラン不足状態になるだろうと云う予想からのものである。

しかし、ウランの価格が二倍変動しても原子力発電のkWH当たりコストには大きく響かない。\$130/kgのウラン価格はUSの原子力発電のkWH当たりコストの中で0.3cents/kWH（新型軽水炉の発電コストの中の~5%）しか占めない。

2. 増殖炉の建設費は運転費は高い

OECD圏の国々で増殖炉のR&Dに\$50billionを投入してきた。各国政府発表による経費は

US	\$15 billion	(billion: 十億)
日本	\$12 billion	
イギリス	\$ 8 billion	
ドイツ	\$ 6 billion	
イタリア	\$ 5 billion	
フランス	\$ 1 billion	(明らかに嘘: cf. Superphenix FRF 65 billion or \$14 billion)
OECD外:	ソ連・ロシア	\$12 billion
	インド	\$? billion

これらの資金投入にもかかわらず軽水炉に競合する可能性は生み出されていない。液体Na冷却増殖実証炉の建設費は同程度の軽水炉の建設費の2倍以上であった。増殖炉が数多く建設されるようになればこの建設費は下げられるだろう。ある見積もりによれば、増殖炉の建設費は軽水炉の25%高よりは低いだろうという。この差は、kWH当たり電力コストに~1.3centsの差を与える。ウラン価格が天文学的に高騰しない限り、増殖炉が軽水炉に競合することはありそうもない。広範な条件において詳細な経済計算によれば、軽水炉使用済み燃料を直接処分する方法の方が、高速増殖炉+核燃料サイクルに比べてはるかに安上がりだという。

3. 高速炉は独自の安全性問題がある。

高速炉は冷却材として水を使えない。また、連鎖反応を持続させるために核分裂物質が高濃度に無くてはならず、したがって同程度の軽水炉に比べて炉心が小さい。したがって更に、冷却材には熱除去効率の高い材料を用いることが必要になる。これまで増殖実証炉で

は比較的低温で熔ける液体金属：ナトリウムが冷却材として用いられてきた。ナトリウムは安全性において利点と欠点がある。

利点：炉はナトリウムの沸点（883℃）より低い温度で運転されるので、内圧が低い。150気圧以上で運転される PWR がパイプの破損で冷却材損失して炉心がむき出しになるようなことは、パイプの破損が炉心より下で起こらない限り、起こらない。

欠点：ナトリウムは水と激しく反応する。空気に触れると燃える。ナトリウムと水が薄い金属隔壁を介して接する蒸気発生器は増殖炉の最も問題のあるところの一つ。少しでも漏れがあると、パイプを破壊してナトリウム・水火災になる。これまで多くのナトリウム冷却炉がナトリウム火災で長期のシャットダウンを経験している。BN-350（ロシア）は大きなナトリウム火災を起こした。次の BN-600 は、複数の蒸気発生器を隔壁を介して設置し、ナトリウム火災を局所に封じ込めて他の蒸気発生器で運転を続け、その間に火災になった蒸気発生器を修復するという設計が施された。1980~1997 年の間に BN-600 は 27 回ナトリウム漏れを起こし、内 14 回はナトリウム火災になった。

ナトリウム冷却炉は重大な信頼性問題がある。

軽水炉の信頼度は相当高まっていて、平均して発電能力の~80%で運転されている。ナトリウム冷却実証炉の多くは、発電しているべきほとんどの時間をシャットダウンしていた。そこでの問題の重要な部分は、ナトリウムに浸かっている部分の保守と修理が困難なことにある。ナトリウムを空気に触れさせてはならないという要請のために、燃料の交換や原子炉容器内の修理は困難かつ時間消耗的になる²。修理の間、燃料を取り除き、ナトリウムを排出させて、ナトリウムが残って火災を起こすことがないように、システム全体を注意深く掃除しなくてはならない。それだけで数カ月~数年を要する。

世界で唯一の商用スケールの増殖炉である Superphenix の歴史の大半は、修理のための長期のシャットダウンであった。実稼働率（lifetime capacity ratio: [実際に発電した電力量] ÷ [継続的に運転されていたら発電したであろう総電力量] に対するその実稼働比）は 7%以下であった。日本の「もんじゅ」、イギリスの *Dounreay* と PFR(Prototype Fast Reactors)、US の *Enrico Fermi 1* 実証炉も同じような長いシャットダウンの歴史が特徴である。ロシアの BN-600 は立派な実稼働率の成績だが、度重なるナトリウム火災をもものともせずに運転されてきた結果である。

臨界安全性：軽水炉は冷却材の水が失われると連鎖反応が途絶える³。一方増殖炉では、Pu-239 の濃度が十分高いため冷却材が無くても連鎖反応が持続する。冷却材が無いと反応度が高まりさえする。さらに悪いことに、炉心の温度が上昇して崩壊すると、より臨界になりやすい構造になり、小さな核爆発を起こして自爆する。そのような爆発で原子炉容器を吹き飛ばされるのかどうか、チェルノビル級の放射性物質放出が起こるのかどうか、未

² 水冷却炉がシャットダウンした場合は、圧力容器の上部の蓋を開け、炉の空間に水を注入して放射線遮蔽とし、水中ペリスコープやビデオカメラで見ながら修理することができる。

³ 4~5%濃縮ウランでは中性子を減速しないで連鎖反応を持続できない。減速されない中性子は U-238 に吸収されてしまう。

知。

4. 高速炉燃料サイクルは兵器 Pu に繋がり易い。

どの原子炉も燃料中に Pu が出来るが、増殖炉では Pu リサイクルが必要となり、増殖炉および通常の原子炉の使用済み燃料から Pu を分離して増殖炉の初期燃料とする過程は、核拡散問題を発生する。

このことは、1974 年にインドが、増殖炉計画のために抽出した Pu を“平和な核爆発”を造ったとき劇的に明らかになった。増殖炉そのものが核兵器 Pu を生産するために使われた。フランスは Phenix のブランケットで核兵器 Pu を生産した^{4, 5}。

インドは米印原子力協定の中で増殖炉を国際安全監視下に置くことを拒否したので、同じことをするのではないかと注目されている。インドのプロトタイプ高速増殖炉 PFBR は 2010 年に完成予定で、径方向ブランケットを再処理して毎年 90kg、軸方向ブランケットも合わせると年間 140kg の兵器級 Pu を生産できる。長崎爆弾は兵器級 Pu を 6kg 使っていたが、現在ではより少ない量で爆弾を造れる。弾頭一つに Pu 5kg として、毎年 20-30 の核兵器が造られる計算。

ブッシュ政権は使用済み燃料の再処理で他の超ウラン元素 (Np、Am、Cm) を Pu に混ぜて強いガンマ線を持たせて取り出すことによって核拡散耐性を持たせる (盗まれない) ことを提案した。DOE はその技術は今ないとして諦めたが、仮にそれが可能だったとしても、この混合物の周辺のガンマ線場は、IAEA が盗まれないために必要とする強さの 1/100 以下であり、Pu が使用済み燃料の中にあるときの放射線場の数千分の一 以下である

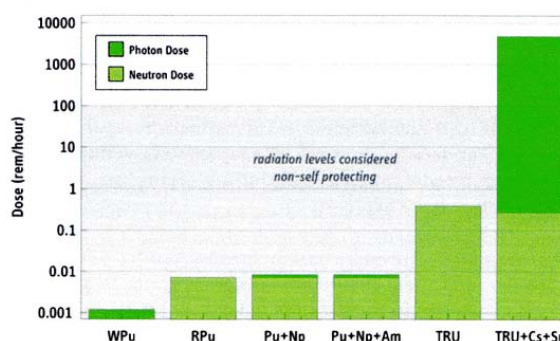


Figure 1.4 Dose rate of a 4.4 kg container of various mixtures of separated transuranics compared to spent fuel. Peak dose rates only approach the IAEA's self-protection standard (100 rem/hour at one meter distance) if high-activity fission products are included. Cesium-137, which has a half-life of 30 years, dominates the radiation field from spent fuel after ten years. (Weapon-grade plutonium [WPu], reactor-grade plutonium [RPu], neptunium [Np], americium [Am], transuranic waste [TRU], cesium [Cs] and strontium [Sr]).¹⁷

⁴ 最近の高速増殖炉の設計では、ブランケットを使わずに燃料棒の中で Pu-239 を生産し、再処理しないで燃やし続ける設計が流行している。その究極の形が TWR (Travelling Wave Reactor)。しかしこの場合でも、兵器級 Pu を生産することは可能。

⁵ 常陽の炉心の周辺部にあるブランケットで、原子爆弾の製造に使用することのできる兵器級プルトニウム (239Pu 同位体純度 99.36%) が 22kg 生産された。この使用済み燃料は、茨城県東海村に建設中のリサイクル機器試験施設で再処理する予定である。

増殖炉の展望

60年と数十 billion（数百億）ドルを費やしても増殖炉の約束は果たされず、多くの国で商用化する努力が減退している。ドイツとイギリスは増殖炉開発計画を放棄した。

フランスでは、軽水炉で蓄積された全てのPuを高速炉で燃やすことができるというArevaの主張にもかかわらず、唯一稼働している高速炉Phenixは2009/3に送電を停止し、この年の末には永久シャットダウンされる予定⁶。世界最初の商用増殖炉Superphenixは1998年にシャットダウンされ、現在解体中。後続の増殖炉計画は少なくとも今後10年間はない。

日本の「もんじゅ」は1年間運転して1995年の事故以後2009年に至るまで運転を再開していない⁷。2025年までに新しい実証炉、2050年に商用増殖炉の計画があるが、実現は疑わしい。フランスと同じく増殖炉が再処理工場の存立の究極の前提になっているので、日本政府は増殖炉から撤退することを考えていないが、増殖炉予算は数十年にわたって漸減し、商用化はますます遠のきつつある。

ロシア、インドは、増殖炉の実証炉を建設中。どちらも、信頼度、安全性、経済性についてのデータが十分でない状態で進められている。インドの場合は、増殖炉が兵器級Pu生産に使われる可能性もある。これらのことは、商用増殖炉のコスト高であることおよび核分裂物資生産禁止条約（カットオフ条約）の観点から、新たに問題になるだろう。

USでは、G.W. ブッシュ政権のときに高速炉は“燃焼炉”計画として舞い戻った。GNEP (The Global Nuclear Energy Partnership) という名前で2006年にスタートしたイニシャチブでDOEは、ナトリウム冷却高速炉によって使用済み燃料の放射性廃棄物の処理がより簡単になるとした。ウラニウムブランケットを取り除くと、燃料の増殖が少なくなる一方で、高速中性子は連鎖反応しない同位体、Pu、マイナー超ウラン元素を核分裂させる。DOEの委託を受けたNAS (National Academy of Science) は1996年に、その方法はコストが高くて利便が少ないこと、世界の超ウラン元素のストックを99%減らすためには数百年のリサイクルが必要であると発表した。オバマ政権と議会はこの見解に従って使用済み燃料処分の別の道を探っている⁸。

増殖炉の夢は死んではいないが遠い将来に退いている。1970年に増殖炉の提唱者たちは今頃には数千基の増殖炉が稼働していると予言していた。今彼らは2050年ごろに商用炉が出来ると云っている。その間世界は、夢の遺産=分離された250Tonの兵器転用可能なPuをどうするか、フランス、インド、日本、ロシア、イギリスで発進してしまった再処理工場のある意味あがきを取り扱っていかなくてはならない。

⁶ 2009/03に送電系統から外されたが、2012年まで研究予定で、同年には解体が始まる予定 (Wikipedia)

⁷ 2010年に試験運転再開。

⁸ 使用済み燃料の最終処分場としてユッカマウンテン計画 (ネバダ) が有力で既に兆円の単位の資金がつかぎ込まれてきたが、オバマ政権によってその計画が停止されている。

2 フランスの高速増殖炉

(Mycle Schneider)

Pu を分離する計画の最初の目的は核兵器の Pu であったが、高速増殖炉計画も早い頃から始まった。

Rapsodie, Cadarache

フランス最初のナトリウム冷却炉、1962 年建設開始、1967 臨界、20MWt。後 24MWt (1967 末)、40MWt (1970) に増力。1980 原子炉容器のクラックの原因と考えられたストレスを小さくするために 22MWt に低減。1983/4 まで運転してシャットダウン。

一次ナトリウムループと原子容器の外の二次ナトリウムループの間に熱交換器を持ち、商用炉に近い設計。炉心には 31.5kg の Pu-239 と 79.5kg の U-235。平均連続運転時間は 80 日運転、燃料の燃焼度は 102,000 MWd/t。

Phenix, MarcouLe

1968 (Rapsodie が 1 年間運転された頃) Phenix 建設開始。CEA(80%)と民間(20%)の共同建設。250 MWe (563 MWt) ; 標準的な炉心は 77%Pu-239 で 931kg の Pu。1973 臨界、1973 送電網に接続 (イギリスの Prototype Fast Reactor PFR 250MWe に 1 年先んずる)。2005 年までに平均運転時間 90 日、燃焼度 150,000MWd/t に達した。

1973Phenix の臨界と送電開始に挟まれた日時、OPEC はイスラエルを支持する国々への原油供給を停止し、原油価格が高騰。1974 フランス政府は始めて大規模に (16 基) 原子力発電に関与し、IAEA は 2000 年までに計 4,450GW の原子力発電所が建設されると予見。1973-76 の間にウラン価格がスポット市場で \$6 → \$40/pound に高騰。このため Pu が長期的な原子力燃料供給を解決するものとみなされた。

Phenix は 1980 年代末までには良い運転成績ではあったが、小規模 (1~20L) の Na 漏れを何度も起こしている。内 1 回は本格的な Na 火災。その後いくつかの説明されていない反応度過渡現象の後、稼働率は事実上ゼロに突入した。炉は 1991-94 のほとんどの期間シャットダウンした。その後、おそらく長期停止によって認可手続きが新規になることを避けるために、ほんのわずかの期間運転再開。1994-2002 には高価な刷新計画が実施された。2003 年 ASN (Autorite de Sdrete Nucleaire) は Phenix を 6 回の燃料交換期間を 2/3 出力で運転することを許可し、これによって 2009 年初頭まで運転された。定格出力は 233MWe から 130MWe に低下、積算稼働率 44.6%。2009 年にシャットダウンされた⁹。

Superphenix, Creys-Malville

1971・72 (第一次オイルショックの前) フランス・ドイツ・イタリアで 2 基 (仏に一基、独に一基) の商用増殖炉を共同建設する合意。1972 “欧州のための電力活動を行う会社” の設立を許可決議。これによって European fast-neutron reactor consortium

⁹ これは不正確。

Phénix, 1973, France, 233 MWe, restarted 2003 at 140 MWe for experiments on transmutation of nuclear waste for six years, ceased power generation in March 2009, though it will continue in test operation and to continue research programs by CEA until the end of 2009. Its scheduled end of life is 2014. (Wikipedia, http://en.wikipedia.org/wiki/Fast-neutron_reactor#History)

(NERSA)1974年に設立。公聴は1974/10-11の1カ月しか行わなかった。

1974 Lyon Physics Instituteの80名の物理学者が増殖炉の固有のリスクを指摘、1975約400名の科学者が仏の核計画一般とりわけ高速増殖炉について懸念を声明。しかしCEA長官Andre Giraudは増殖炉導入の遅れは“期待されるウラン貯蓄に壊滅的な結果を与えるだろう”として急速かつ大量の増殖炉導入を要求。Superphenix計画の公聴委員会は、増殖炉は2000年までにフランスの原子力発電の1/4を占めるだろうと見積もった。

1976 ジスカールデスタン大統領が主宰する限定エネルギー委員会は Superphenix を建設することを政治決定、Creys-Malville (45 km East of Lyon, 60 km from Grenoble、70 km from Geneva)に立地選定。しかしこの建設計画が公表されたのは1年後。1976年夏 Superphenix 建設に反対する20,000名がこの場所を占拠して抗議、およそ50の付近の自治体が反対、1976 ジュネーブ地区の約1300名の科学者がフランス、イタリア、ドイツ、スイス政府に公開書簡を送付して懸念を表明。

CEA長官Andre Giraudはますます楽観的、1976のAmerican Nuclear Societyの集まりで、2000年には世界で540基(内20基フランス)の商用増殖炉がある¹⁰、2025年には Superphenix級の高速増殖炉は2766基と予測。

1977 Creys-Malville 近くで開かれていた国際的な集会の50,000人ほどの参加者が暴徒化、警察の鎮圧で3名死傷。フランスの反原子力運動のトラウマ的な出来事だったが、政府の方針は変わらなかった。“政府は Superphenix を建設する計画を止めない、フランス国民の生命と安らぎの問題だからだ”(Rene Monory、当時の産業相の3日後の声明)

1979年にTricastinで操業を開始したEURODIFウラン濃縮共同体が欧州のプルトニウム産業が核におけるUSの優位から独立する目的を持っていた。ジスカールデスタン大統領は“フランス国土からのウランを高速増殖炉に使用すれば、フランスはサウジアラビアに匹敵するエネルギー資源を持つことになる”と宣言。カーター大統領の核非拡散政策はGCEAによれば“全く馬鹿げている”ものだった。

1982年CEAの技術者Jean-Louis FenschがSuperior Council on Nuclear Safetyに提出した250ページの報告で、“高速増殖炉は、これまで核燃料の消費を減らす目的で人間が発明した方法の中で、最も複雑、最も汚染性が高く、最も非効率で最もあいまいな手段である”と書いた。

1985 Superphenix 臨界。しかし原子力に対する世界の熱は峠を越し、原子力発電所建設はピーク時の40(1975)に対して1(1985)になっていた。1986年のチェルノビル事故は単にこの減速傾向を促進させただけに過ぎない。Superphenixの目的はウランを節約することだったが、運転を開始した頃には時代遅れになった。ウラン価格は\$40/poundから1974年の価格より少し上の\$15/poundに下落した。ウランの需要に対してウラン資源は豊富だった。

それでもフランスの原子力政策者は計画を変えなかった。その結果発電容量が過剰になり(1980年代半ばには少なくとも原発10基分過剰)¹¹、Puの存在意義が失われた。1987-97

¹⁰ 実際には、Superphenix級の高速増殖炉は2000年の段階で1基も稼働していない。

¹¹ フランスがヨーロッパの原子力電力を支えている現状は、この供給過剰を吸収する必要性と裏腹である。

年の間La Hagueの再処理能力は4倍、1700ton/Yにもなったが、そのおよそ半分は外国のために使われた。使用済み燃料中のPuはおよそ1%であるとして、1997年にはLaHagueの施設で17tonのPuが分離された。

Superphenixの炉心には5780kgのPu(4054kgのPu-239)があった。定格出力で運転されて年3回燃料交換されていたら、Superphenixは毎年1900kgのPuを吸い込んでいた筈だが、その11年間の運転期間中炉心1個分のPuさえも消費しなかった。

Superphenixの出力はnet 1.2GWeと見積もられて、1985に臨界に達して1986に送電網につながれたが、いくつかの技術的および管理上の問題に見舞われて、最後の発電をした1996までの半分以上の期間をシャットダウンしていた。Superphenixは全部で8.2TWH(gross)を発電したが、そのほとんど半分は最後の1年間のもの。全稼働率は7%以下。

Superphenixは一連の重要な事故と管理上の障害を経験した。炉は17カ月以上連続して運転されたことはなく、1987には燃料移送タンクあるいは貯蔵容器ナトリウム漏れが発見されて運転が停止された。タンクを修理することができず、炉心から燃料を除去して入れ替える新しい方式を開発するのに10カ月を要した。

この事故で、フランスの高速増殖炉の組織の問題も明るみに出された。ナトリウム漏れが起こる前の1985年末、FRAMATOMEの系列会社NOVATOMEはスタッフ750名のほとんど半分430名を解雇した。NOVATOMEはSuperphenixの商用運転開始までの業務についてNERSAに請求できず、資金繰りできなかったのである。ナトリウム漏れが起こったときには、タンクのエレクトロニクスデータベースを管理していた専門家たちが去ってしまっていた。データベースにアクセスすることに時間を要し、次いで再検定して新しい燃料交換システムを認可するのに13カ月要し、1989に運転再開した。低出力運転が1990まで行われたが、この時欠陥コンプレッサのために空気が系内に漏れこんでナトリウムが酸化した。ナトリウムの精製に更に8カ月を要した。1990には大雪が積もってタービン室の屋根が崩れた。

1991 NERSAは運転再開を申請したが、French Conseil d'Etatは1989年の運転再開認可を無効とし、当初の認可方式を変えて、議会の審議と国および地方のレベルで検討することを義務付けた。

1993年に識者の意見を聴取して公聴にかけた。結局新しい運転認可は1994に降りた。Superphenixがオンラインに戻って7カ月も経たないうちに、熱交換器にArが漏れてまた問題となった。1995に運転再開したのが、それで最後だった。

1996年のクリスマスでSuperphenixは保守のためにシャットダウンしていた。1997年2月、Conseil d'Etatは1994年の運転認可を取り消し、7月Jospinは“Superphenixを放棄する”旨声明した。この政治決定は1998年2月には公認のものとなった。

Green Partyの代表が入閣し、Dominique Voynetが環境相に就任して核の安全性について産業相と分担することになった。Green Partyの選挙活動の中の第一の課題はSuperphenixの閉鎖だった。それはフランスの原子力反対派にとって象徴的な課題でもあったので、Green Partyが入閣したらSuperphenixはお終いであることは分かり切っていた。それに、少なくともEDF(Electricite de France)の上層部の一部は、Superphenix+

Reprocessing は高価な誤りだったと永いこと思っていたことも疑いが無い。

フランス外交筋は Superphenix 停止の影響を少なくすることに意を用いた。“Superphenix の閉鎖を含むフランスの措置について、フランスは原子力政策を変えたのかと考える向きがあるかもしれない。答えは NO だ。フランスは原子力の持つ経済競争力、自己充足性、環境保護などに着目して賢明に核に関与している。フランスは再処理と Pu リサイクリングの政策、より多くの電力を生産してかつ廃棄物処理を最適化するための良き方法、に固執し続ける。それは驚くべきことではない。フランスの誰もが思っている：石油が無い、ガスが無い、石炭が無いということは他に選択が無い！ということだ。それで救われるということもある。”（US のフランス大使館の“フランスからの核の発言” 1998）

フランスの原子力安全局には Superphenix 運転期間中のただ 1 つの出来事として、主燃料貯蔵タンクからのナトリウム漏れが記録されている。このタンクは新燃料と使用済み燃料を交換・貯蔵するもので、このプラントの鍵となる設備の一つである。漏れは 1987/4/3 に発見されて、10 か月シャットダウンすることになった。より悪いことに、このタンクを修理することが出来ないことが明らかになった。設計ミス（悪い材料）が漏れの原因だったのだ。全く新しい燃料着脱装置が開発されなくてはならなかった。

Phenix からの軍事用プルトニウム

CEA 軍事部門は、高速増殖炉のブランケットの中で超高品質の Pu が生産されることに関心を抱いている。Superphenix プロジェクトの中では分類的には常に軍事との関係を排除してきたものの、Phenix はフランスの核兵器のための Pu 生産に使われた。Superphenix も軍事利用が可能であることは、特にドイツで懸念され、フランスが中性子爆弾を開発してヨーロッパに配備する可能性が議論された。

Phenix では、径方向ブランケットだけでなく軸方向ブランケットも兵器用 Pu を生産できるような燃料設計になっている。普通軸方向ブランケットは炉心燃料と同じ燃料ピンで一体化されているのだが、Phenix の場合は上部軸方向ブランケットは分離されているようだ。Phenix のブランケット材料は Marcoule の軍事 UP1 プラントで再処理されが、炉心材料は、ガス炉燃料と希釈されて、La Hague および Marcoule の専用パイロットプラントで再処理される。

1978 年に Jean Thiry 将軍の日刊 Le Monde 紙へのインタビュー発言：“フランスは全ての種類の核兵器を造ることが出来る。高速増殖炉が必要なだけの Pu を生産してくれさえすれば、大量に核兵器を造れる。” 1987 年に彼はその発言を確認し、“Pu はいつでも得られる、特に…を開発すれば。こういうことは倫理的でないのであからさまに云ってはならないことだが、しかし私は Superphenix を擁護する。なぜなら、そこに非常に良質の兵器級 Pu があるのだから”。Dominique Finon は、Phenix の軍事利用は 1978 年から開始されたが、Superphenix を軍事利用することは 1986 年に放棄されたと云っている。

3 インドの高速増殖炉

M. V. Ramana

インドは 1050 年代以降「三段階の原子力開発計画」を立てている。

第一段階： 重水炉でウラン燃料を用い、再処理して Pu を取り出す。

第二段階： Pu を高速増殖炉の初期燃料として炉心に入れる。炉心を劣化 U か天然 U のブランケットで囲めば Pu 増殖、ブランケットが Th なら U-233 が生産されるが、更に引き続く増殖炉を建設するために必要十分な Pu が得られるまでは、増殖炉は U ブランケットが装荷される。

第三段階： U-233 を炉心に置き、Th をブランケットに配置した増殖炉である。Th-U-233 サイクルの成長は遅いが、全く U を必要としなくなることがこの方向に進む理由である。この三段階計画は、遅くて期待外れの進展であったにしろ、公式的に増殖炉を追求することの理由である。

高速増殖試験炉 (FBTR) 1971 に認可、(1976 運転の予定が) 1985 臨界、蒸気発生器は 1993 に稼働。最初の 15 年は異なる大きさの種々の事故。1987 の事故は燃料要素を移動するための駆動機構の保護回路の故障に関連して炉心部を破損させ、修復に 2 年を要した。Na 漏れは運転開始後 15 年間は起こらなかったが、2002 に一次 Na の精製室で 75kg の放射化した Na が漏れた。修復に 3 カ月。他にも説明不能の放射能のようないくつかの異常あり。FBTR が定格で 15 日を連続運転できるようになるのに 15 年かかった。初めの 20 年間で 36,000 時間運転 (利用率~20%)。にも拘わらず、IGCAR は高速増殖炉の“設計、建設、運転を成功裏に実証した”と主張している。

高速増殖原型炉 (PFBR) 2000 に運転する予定の初期の計画から遅れて、2004 建設開始、2010 に運転開始の予定。

安全性への危惧

- ・ 反応度が最も高い構造で設計されていないため、事故が起きて燃料の束が溶けて配置が変わった時反応度が高くなることで、**炉心崩壊の潜在的可能性**がある。
- ・ Na の正のボイド係数。
- ・ 比較的密閉性が弱い；原子炉容器は 25kPa (1/4 気圧) の耐圧しかない¹²。これが炉心崩壊時のエネルギー放出に耐えられるかどうかが詮索されている。

経済性 DAE はインドにはウラン資源がおおよそ 60,000 トン、10GWe の OHER(加圧型重水炉)を支える程度しかないという理由で増殖炉を追求するとしているが、PFBR の建設費は (DAE が建設してきた全ての原子炉で建設費超過していることもあり) 実際より小さめに見積もられている。筆者の見積もりでは、高速増殖炉による発電原価は重水炉の 1.4 倍。このような重水炉優位の状態はウランの価格が上昇したら逆転しえるが、それは\$1400-

¹² 軽水炉の原子炉容器の閉じ込め内圧は通常 200kPa

\$2200/kg となった時である。このような高価格では採掘可能な U の量は 1240– 420 倍と劇的に増える。インドは増殖炉と再処理なして、PWR による原子力だけで数十年やっていくだけのウランがある。

兵器用プルトニウム？

DAE が増殖炉に固執するもう一つの理由は、DAE は発展のための電力だけでなく、兵器級 Pu にも関心があることから出てくる。これは米印原子力協定の中で明瞭に現れていて、表向き民生の合意であるものの、DAE の努力の大半は種々の制約特に国内のウラン資源が少ない中で、効果的に核兵器庫の核分裂物質を作ることに向けられている。特に際立っているのは、DAE は増殖炉計画を安全管理の外に置くことに多大の注意を向けていることである。国の新聞インタビューで DAE 首脳が云うところでは；

長期にわたるエネルギー保障と最低限の抑止力という視点から、増殖炉計画を非軍事リストに加えるわけにはいかない。それは足枷をはめられることだ。インドは一方のために他方（安全保障）を危うくすることはできない。

同じく、DAE は再処理工場や原子炉級 Pu を非軍事として区分けしていない。したがって、PFBR のような増殖炉が安全監視されていない原子炉級 Pu を、歴史的に備蓄されたのや将来再処理されたものの区別なく、兵器級 Pu に転化して使うことが可能になる。原子炉級 Pu は PFBR の炉心で消費されるが、兵器級 Pu はブランケットの中で造られる。詳細な三次元モデルのニュートロニクス計算によれば、PFBR の稼働率を 75% として、径方向ブランケット（軸方向ブランケット）の中で 93.7%Pu が 92.4kg（96.5%Pu が 52kg）が毎年生産される。

ブランケット燃料要素を、炉心燃料要素と一緒にせずに、独立に処理すれば、その Pu は兵器に使える。インドの PHWR の使用済み燃料を再処理すると毎年およそ 346kg の Pu が出てくる。現存の原子炉級 Pu と PHWR 使用済み燃料からの Pu で、PFBR で燃やす Pu 需要を満たすことが出来るので、DAE が PFBR ブランケットから兵器級 Pu を獲得する戦略は何倍も可能性を持っている。

4 日本の増殖炉と燃料サイクル Tatsujiro Suzuki

高速増殖炉と核燃料サイクルは 1950 年代以降日本の核エネルギー開発の要であったが、経済的・技術的・政治的な理由で遅れている。高速増殖炉の予算は 1990 年代半ば以降漸減し、商用化目標は 1980 年代から 2050 年代にスリップした。これには実証炉「もんじゅ」の事故が大きく影響しているが、R&D して早期に商用化を図ることから、改良型燃料サイクルへと視点が移ってきている。

にも関わらず、日本は依然として高速炉開発に関与している。日本が高速炉に固執するねじれた状態は、官僚的な惰性、地方自治体への関与、R&D 視野の欠如などいくつかの非技術的な要因によって引き起こされている。

日本は 2025 年に実証炉を運転すべく R&D プログラムを立て直しているが、これは原子力長期計画とブッシュ政権の GNEP (Global Nuclear Energy Partnership Program) に応える形で行われている。増殖炉 R&D プログラムは、余剰 Pu 管理、使用済み燃料管理、燃料サイクル技術、産業・国・自治体のコストとリスク分担など、重要な課題に直面している。したがって、増殖炉はさらに進行が遅れる可能性がある。

最初の実験炉“常陽” 1977 年臨界 (50MWt)。1979 年に 75MWt、1982 年 Mark II 炉心で 100MWt。1983~2000 常陽は燃料や材料の照射試験に用いられた。2003 年以来 Mark III 炉心 (140MWt) で運転され、2007/4 に 6 回目の運転サイクルを終了した。2007/3 までに常陽は 70,000 時間運転し、1977~2007 の 30 年間の平均稼働率は 27%であった。

原型炉「もんじゅ」(280MWe) 常陽と並行して開発されたが、臨界は 1994。1995/12/8 二次ナトリウムループに取り付けられた熱電対挿入管が振動で破断し、ナトリウム漏れが発生。この事故を PNC が隠ぺいしようとしたことで、非難がまきおこり、修復と再起が遅れた。2001/1 に PNC は再運転を申請し 2002/1 に認可された。これに対する異議申し立てがあつて更に遅れ、3003/1/27 に名古屋高等裁判所金沢支局は建設を認める 1983 年の判決を逆転させた。2 年後の 2005/5/30 最高裁は PNC に対する裁定を下し、「もんじゅ」再開への全ての障害が取り除かれた。再開は 2008/10 とされたが、2010/1 現在まだ運転されていない。

日本原子力発電株式会社 (JAPCO) は 1994 年に 660MWe の実証炉計画を終了させていたが、「もんじゅ」事故によって遅れ、結局 1990 年代末にキャンセルされた。

「もんじゅ」事故後の重点の移動 事故後、原子力委員会は高速増殖炉についての特別円卓会議を作って新しい政策を策定した。西沢潤一 (東北大) 委員長、岡本行雄 (元外務省)、竹内佐和子教授 (エコノミスト)、吉岡斉教授 (九州大学で原子力批判派) など原子力外部の人も参加。委員会は高速増殖炉開発を継続することを確認したが、それは究極の目標と

いうよりも有望なオプションであるとみなして、より現実的で柔軟なオプションを推奨した。“技術的経済的な観点から R&D を定期的に見直す”ことを示唆した。

この報告に従って、2000 年の原子力長期計画では“将来のエネルギー問題に備えて…高速増殖炉と関連する燃料サイクルの技術オプションを保持し…”、“現在開発されているナトリウム型高速増殖炉と PUREX (湿式) 再処理技術に代わる種々の技術”を探索することを推奨している。

日本の高速増殖炉技術開発における社会政治学的な要因

1. 組織の問題

1967 年特別立法によって PNC が固有の高速増殖炉+燃料サイクル技術を開発する任務をもって設立された。1995 年の「もんじゅ」事故後 PNC が核燃料サイクル機構 (JNC) と改名されてもこの任務は継続。続いて JNC は日本原子力研究所と統合されて JAEA になり (2006)、高速増殖炉+燃料サイクル技術開発の任務を継承。このように高速増殖炉は法的・連続的に関与が続けられているので、原子力研究の予定を変更することはむづかしい。

2. 地方行政

地方行政は原子力施設に複雑に影響される。政府が原子力施設を受け入れる自治体に与える交付金と云う財政報償金は地方財政に大きな役割を果たす。自治体は年間数 10 億円の資金を国から得、これと原子力施設からの税収入が地方財政に占める割合が大きい。故に、「もんじゅ」事故後の隠蔽があったことに強い憤りがあるものの、地方自治体はプラントを再開することに強く引き付けられている。

高速増殖炉+燃料サイクル政策の推進力となっているもう一つの力は、使用済み燃料を保管する場所を見つけることが困難なことである。発電所内の貯蔵プールは満杯になりつつあるので、再処理が唯一の選択のように見える。再処理が高速増殖炉の商用化の道を開くとすれば、より説得力が生ずる。

3. 展望の欠如

原子力委員会は日本の原子力 R&D 計画を総括して決定する。原子力委員会は R&D 研究施設に目標や計画を変更することを助言する一方で、その R&D 計画を認証する。

2001 年、内閣総理大臣を議長とする総合科学技術会議が内閣の中に作られた。そこでは政府機関から提出された主要な R&D 計画を評価して、S (重要性大)・A・B・C (重要性小) の 4 段階に格付けし、既得権などによる予算配分に対して内閣が指導力を持つことを狙う。「もんじゅ」計画は“S”、高速炉サイクルシステムの適合性研究 (FaCT¹³) は“A”の評価を与えられた。したがって、科学技術総合会議が「もんじゅ」計画や FaCT を無視することはあり得ない。

将来展望と主な事から

¹³ FaCT : Feasibility Study on Commercialization of Fast Reactor Cycle Systems

原子力立国計画では高速増殖実証炉の完成を 2025 年、商用化を 2050 年としているが、いくつかの障害がある。

Pu 備蓄の管理

日本には 46ton 以上（国内に 8.7ton、ヨーロッパに~37ton）の分離された Pu の備蓄がある。これを MOX 燃料にリサイクルするプログラムはあまり進行していない。六ヶ所村の再処理工場（年間 800ton の使用済み燃料処理能力）が定格で操業開始したら、備蓄は増える。

Pu 備蓄を減らすことは日本の最重要課題であるから、Pu を増殖させる政策は日本の原子力政策にとって重要な目標にならない。

使用済み燃料管理と燃料サイクル技術へのインパクト

日本は種々の再処理方法と MOX 燃料製造方法を検討してきており、その中には高速炉の金属燃料を熱処理するためにアメリカで開発された技術も含まれている。歴史的に言えば日本の再処理は、Pu が欲しいからでは無く、使用済み燃料の管理のために必要なのであった。この目的が保持されているとすれば、日本の第二再処理工場は、使用済み酸化ウラン燃料を湿式処理するものになるだろう。これまで日本の再処理技術は古典的な PUREX 法に重点が置かれている。

日本で MOX リサイクリングが追求されれば、使用済み MOX 燃料が溜まって、それを再処理しなくてはならなくなるかもしれない。第二再処理工場の技術選択は難しい政治問題なのである。

利害関係者のコストとリスクの分担

高速増殖炉燃料サイクルが全体としてどのくらいかかるのか、誰がそれを負担するのか明らかでない。原子力立国計画では実証炉についてコスト分担を提案しているが、その先のコスト分担については不明。一方、経済産業省の次世代軽水炉計画では軽水炉の寿命を 60-80 年に延ばすことが目標の一つになっている。この目標が達成されると、高速増殖炉は 2050 年になっても必要でなくなるかもしれない。

結論

日本は公式的には高速増殖炉+燃料サイクルシステムを追求しているが、高速増殖炉の商用化の目標日程は退き、予算も縮小している。日本が高速増殖炉に関与し続けているのは、軽水炉燃料サイクルのバックエンドの問題に影響している社会政治的な要因によるところが大きい。原子力立国計画では日本の高速増殖炉と改良型燃料サイクルへの関心が再び高まった。それは部分的に国際的な動向、特に GNEP イニシャチブによるものであるが、これはその後オバマ政権と US 議会の支持を得られなくなっている。

5. ソ連・ロシア高速炉計画 Gennadi Pshakin

ソ連の高速炉計画は物理学者 Alexander Leypunsky が 1949 年に消費した以上の燃料を生産する原子炉のアイデアを進言したときから始まる。将来ソ連の原子力産業が急速に成長したらウラン不足になるというのが理由である。1949 年 11 月高速炉開発計画を打ち上げて Leypunsky を科学リーダーとして Obninsk に IPPE (Inst. Physics and Power Engineering) が建設された。プログラムは多くの領域で不適切な知識による論争であふれていた：候補となる炉型、炉心、照射下冷却材、蒸気発生器の設計など。この計画は壊滅的な大戦の 4 年後、多くの物資とふさわしい人材が不足していたときに行われた。

初めの 10 年間 1949-59 (調査検討期)

BR-1：金属 Pu、冷却材なし、増殖比 1.8 という実績によって増殖のアイデアを実証。

BR-2：金属 Pu、水銀冷却、水銀が配管の継ぎ目から漏れて鉄製被覆を腐食

BR-5：酸化物 Pu、液体ナトリウム、5MWt→10MWt。炉の R&D に加えて RI 生産・医療（喉の癌の中性子捕捉療法）にも利用

第 2-3 10 年期 1960-80 (高速炉技術利用の経験の蓄積期)

BFS-1(1961)：臨界実験施設、3m³までの炉心の種々の配置を実験。Na ボイドの実験。

BFS-2：10m³までの炉心シミュレート

BOR-60 (1969)：燃料試験炉。振動充填燃料など試験。現在も運転中。

実証炉 BN-50 計画を BN-350 (350MWe)に増力して建設開始 (1964)、1972 運転開始。

1973Na 火災、4 か月後再開、以後 1999 の永久シャットダウンまで継続運転。

BN-600 (600MWe)：ウラル地区の Beloyarskaya 原子力発電所の一つとして建設。現在も運転中。1997 までに 27 回 Na 漏れ、内 17 回 Na 火災。いずれも災害を伴うことなく鎮火・修復され“解決不能な問題は起こらなかった”。(複数の蒸気発生器はモジュールになって切り離されており、炉の運転を停止することなく修理が可能。)

1990 年代 低迷期

BN-800、BN-1600 計画。BN-800 は 2009 現在建設中。

BN-800 をウラル地区に 5 基建設する予定だったが、チェルノビル事故 (1986) 原子力計画削減。1990 年代のロシア経済では新しい発電所の建設は不可能、かつ高速炉は軽水炉やグラファイト減速炉と経済的に競合できないと見られており、カザクスタンで高品質のウラン鉱床が見つかった。

2000 年代

プーチン大統領国連でロシアの原子力増強計画発表：軽水炉に重点を置きつつも、高速炉も商用化する。その第一弾は BN-800 の複数のレプリカと BN-1600 の完成。高速炉計画はいくつかの目標を持っている。

1. ウラン・プルトニウム燃料閉サイクル
2. トリウムブランケットで U-233 を生産して熱中性子炉の燃料とすること

3. マイナー超ウラン元素、ネプツニウム、アメリシウム、キュリウムの分裂

4. 最終地層処分される高放射性物質を減容すること

高速炉の安全性

臨界安全性、反応安全度など初期の実験炉でよく調べられている。Na 漏れについても同様よく理解されている（Na 漏れはあり得ることとして、蒸気発生器をモジュール化）。

経済性

二次ループが挿入されることによって構造材の量が同じレベルの軽水炉の約 50%増える。建設費は 11%増し、kW あたり 40%増し。

6. 英国の高速炉計画

Walt Patterson

Harwellの原子力研究所の物理学者たちの間で“一般的に合意の在った唯一のことは…自らが消費する一次燃料以上の二次燃料を生産する増殖炉が長期的には圧倒的な重要性を持つという点であった。¹⁴⁾多くの不一致があった中でこのとだけは一致していたのは、ウランは少なく高価だったため。かつ、その供給は兵器がらみでひどく政治的に敏感だった。Harwellの所長 Sir John Cockcroft 卿は

私たちは、一次 U-235 燃料を燃やすのと同じ速さあるいはそれ以上の速さで燃料を増殖する“増殖炉”と呼ばれる新しい原子炉を開発しなくてはならない。この原子炉には困難な技術的な問題があるだろうので、実際の動力炉を開発するまでには相当の時間がかかるかもしれない。その運転にも二次燃料を分離する工程で難しい化学工学的な操作がからんでくるだろう。

Risleyの核技術者たちは、Harwellの研究者と数年間一緒に研究した結果、1953年にはこう結論した：

この高速炉は一見非現実的に見えるが、より検討を加えると魅力的に見えてくる。この高速炉はまじめな技術的な提案とはならないと云ってよいだろう。

にもかかわらず、1955 スコットランド北海岸にある Dounreay 実験炉研究所に高速実験炉 DFR (Dounreay Fast Reactor) の建設が始まった。この立地は正に遠隔であることによって選ばれた。炉心に含まれるこれまでにない量の燃料の挙動がどのようなものになるのか予測できなかったためである。

DFR (1959 臨界、60MWt, 14MWe) の設計だが、到達は 11MWt) は冷却材に熔融 Na-K 合金を用いることを含めていくつかの技術的な問題を明らかにした。1961 炉心改良によって 30MWt に達し、送電を開始。1996 DFR はようやく 60MWt に達した¹⁵⁾。

AEA は当初から大きな計画を持っていた (1964 頃 1GWe の案) が、スペックダウン、それでも 600MWt (250MWe) のプロトタイプ PFR を設計 (1965)、1973 臨界の予定が一次・二次 Na ポンプの不具合が見つかって試験が長引いた。1974 イギリス原子力学会が“高速炉国際会議”を主催した際、会議の1週間前に初めて制御棒を引き抜いた。そのことが会議の初日に得々と発表されたが、会議の最終日、Phenix が定格に達したとフランス側が発表した。1974 のほとんど PFR は低出力で運転。

AEA による高速炉の急速な導入を批判する論文が CEGB (Central Electricity Generation Board) の Berkeley 原子核研究所の原子炉物理部の長 Erie Carpenter によって出された。

“信頼性の問題は重大である。建設の遅れと同時に、信頼性に欠けることが、小冊子予測が主張するどのような利点にも関わらず、電力コストに有害な影響を与えるだろう。” “高速増殖炉を性急に導入すること

¹⁴⁾ 戦後の英国の核活動に関する Margaret Gowing の著作 Independence and Deterrence

¹⁵⁾ 1965 に冷却材の流れの不均一のためにウラン燃料の温度が上昇して燃料棒が変形あるいはスエリングする事故があったが、将来の高速炉の冷却材の流れ状況が異なること、燃料はセラミクスになることなどの理由で改善可能とされた。

で原子力システム全体経費が節約される程度は“高速炉と熱中性子炉の建設費が同じであると云うあり得ない状況のもとで” たかだか5%が節約されるにすぎない。”

1975PFR は最初の電力生産。しかし定格の12%より少し上止まりであったのは、3つの蒸気発生器の内2つが故障、残りの一つにも小さな漏れがあったため。AEAは“原子炉はよく稼働したが、原子炉とは別の部分：蒸気発生器で問題があった”と強弁。

このような中でAEAは1970年代初めから1.2GWeの本格商用炉の建設許可を求め、2000までに計104GWeの原子力発電所、内少なくとも33GWeが高速増殖炉とする案を「環境汚染に関する王立委員会」（委員長の名をとってFlowers委員会）に提出（1975）。委員会はイギリスが本格的スケールのプラントを1基建設することは高速増殖炉の持つ“重大な基本的な問題”を解決することに役立つだろうと譲歩。その上で、

実証炉は遠隔地に立地しなくてはならない；Pu輸送に関わるリスクを取り除くために、再処理工場と燃料製造工場は同じサイトになくなくてはならない；物理的な防護と武装した警備兵両方が必要だ；Puの計量管理の経験がこのシステムに組み込まれていなくてはならない。（Flowersの書簡）

王立委員会は高速増殖炉を1基建設して安全と社会的な意味についてアセスメントすることの意義を認めたが、“これは懸念を持って進める高度に重要な第一ステップとみなすべきである…純粋に環境の視点から、我々が採用されることが望ましいと考えるのは、CFR1の開発を遅らせることである。（）イギリスの原子力界は1基の増殖炉は建設されるべきであると云う意見に偏っていたが、それが“商用”であるならば電力会社はその資金を負担しなくてはならない。CEGBは料金を負担しなくてはならないのなら高速増殖炉は望んでいなかった。政府はゴーサインを出せなくなっていた。

AEAは提案するプラントをCFR（Commercial Fast Reactor）からCDFR（Commercial Demonstration Fast Reactor）とラベル替えして自らの地位を傷つけた。

1974のOPECのオイルショックは先進国の景気後退を招いた。燃料価格の高騰によって人々は改めて自分たちがエネルギーを使いすぎていることに気がついた。電力消費の増加が止まり、イギリスのようないくつかの国では減少しさえした。利率が二桁になったので、建設費の高い原子力発電は従来燃料に対して競争力を失った。Pu燃料を中心とする壮大な世界エネルギー構想の妥当性はますます失われた。1978以降、イギリスのガス冷却グラフィット減速炉を継承したPWRの導入は、高速増殖炉を暗に邪魔立てした。

Dounreayでは、寄せ集めた廃棄物質（多くは目録になく記録もされていなかった）を沖合の海底廃棄物トンネルにつながる通路に廃棄していた。1977/5 この通路で爆発が起きて5トンのコンクリート蓋を吹き飛ばし、破片を四方にまき散らした。Na-K冷却材で汚染された廃棄物が水素を発生させたのだった。

1979 に誕生したサッチャー政権は公式に増殖炉を支援したが、原子力論争の中心は Sizewell B (PWR) にあった。1982 の下院議会でのエネルギー局長 Nigel Lawson の発言：

政府は高速炉についての検討を終了した。高速炉はイギリスと世界のエネルギー供給にとって…重要…。この技術開発で世界のリーダーであるイギリスは…Dounreay モデルに基づいた高速増殖炉計画の開発を引き続き行うことを決定した。…しかし、発電所発注のフェーズは次の世紀の初めになるだろう。開発計画はこの時間スケールに下って巻きなおされるだろう。…

Nuclear Engineering International の 1983/2 の記事：

高速増殖炉のために世界中で使われてきた多額の金額を正当化することはますます難しくなっている…これまで使われた膨大な額と高速増殖炉が商用電力のオプションになるまでに今後消費される額とを埋め合わせることが本当に可能だろうか？ ウラニウムが突然使い尽されたり過度に高価になることはない…動向を見極めるための時間はたっぷりある。しかしおそらく高速増殖炉の経済にとってウラニウムがあるかないかより重要な問題は、技術の進歩によって軽水炉からの使用済み燃料の貯蔵が可能になって再処理することが避けられるようになることだろう。再処理の不確かで増大するコストは高速炉に上乘せられるから、高速炉は決して経済的にならないだろう。福音書的な熱意が真つ当な技術的な議論にとって代わることはできない

1984 会計検査院は“原子力の開発”と題する辛辣なレポートを発表して AEA の予算運営について懸念を表明。次いで下院の公衆問題委員会が調査に入った。当時並行して、Dounreay に隣接する海岸に使用済み燃料の放射性物質が広がっているのが見つかり、放射線影響に関する公衆の関心も高まった。1986 のチェルノビル事故が多くの原子力反対活動に拍車をかけた。

1988 政府は高速増殖炉への予算を大幅削減。40 年と £2400 million 以上の予算を費やして、全くの行き詰まりであることが明らかにされたに等しい。20 年後の今 Dounreay の後始末と公衆資金の乱費が続いている。一時は全権を持っていた AEA は、解体して民間に払いだされ、過去の利己の影を残すだけになったが、Dounreay での仕事は今後数十年続くだろう。

PFR の廃炉は、悪名高いトンネル通路や池その他の清掃を行ってこのサイトの汚染除去を行うことに 2030 年以降までかかるだろう。その後ろにもう一つの問題が控えている。高速増殖炉計画の崩壊の結果イギリスにはおよそ 100 トンの分離された Pu 備蓄がある。それはどうなるのか？ 政府は何も云わない…多分誰も知らないのだ。

7. アメリカ合衆国の高速炉開発

Thomas B. Cochran, Harold A. Feiveson, and Frank von Hippel

真珠湾攻撃の直後、ノーベル賞受賞物理学者 Arthur H. Compton の下シカゴ大学で兵器用 Pu 生産の研究がとりまとめられた。1944 年初頭には Compton とシカゴの科学者たちは冶金研究所の戦後の役割について考えるようになっていた。誰もが核分裂物質が少ないことを考えていた。多量の核兵器のための高濃縮ウランや Pu を生産するために十分なるウランがあるかどうかさえも明らかでなかった。冶金研究所の Fermi たちは最小限の資源で最大のエネルギー、兵器用 Pu を生産する方法を探し求めていた。原子炉のある種の配置によって U-238 を核分裂性の Pu-239 に、U-235 が消費されるよりも速く、転換することができることに気が付いていた。1944 Fermi の同僚 Walter Zinn がリクルートされて増殖炉の詳細な検討を行った。結局トリウムの中で U-233 を増殖させる案は諦めて、U-238 から Pu-239 を増殖するという当初の案を確認した。1945 に Fermi は“増殖炉を最初に開発した国が原子力で大きな競争力を持つだろう”と語った。

世界最初の高速炉 Clementine (水銀冷却実験炉 25kWt) Los Alamos の Omega Site (TA-2) に建設: 1946/7/8 建設、1946 末臨界、1949/3 に定格運転。この炉の運転を通してエネルギーと核分裂物質 (兵器用も含む) 生産のために適した高速炉についての知見を得ることが目的。

燃料は Pu 金属、鉄製の燃料棒の両端に天然ウランのスラグを配置。燃料棒は鉄製のカゴに設置されその中を電磁ポンプで駆動された水銀が流れる。炉心は同心円状に置かれた 15cm 厚の天然ウラン反射体、15cm 厚の鉄反射体、10cm 厚の鉛遮蔽で囲まれている。

1950/3 制御棒の不具合でシャットダウン、1952/9 運転再開したが、1952/12/24 に燃料棒が破壊。ウランスラグがスエリングして被覆が壊れて Pu が水銀冷却材に放出された。その後炉は解体された。

LAMPRE-I: Clementine 後 Los Alamos ではもう一台の高速炉が少しの間運転された。このナトリウム冷却炉は溶融 Pu を燃料とし¹⁶、1961 初頭に臨界に達した。設計出力は 20MWt であったが、炉心の高温高放射線場での材料挙動の知識が十分でなかったため、20MWt は後続の予定の LAMPRE-II に譲って、1MWt に出力を落として 1963 半ばまでに数千時間運転された。LAMPRE-II の資金は実体化されなかった。

Hyman G. Rickover 将軍は潜水艦推進のための高速炉を少し実験した¹⁷。それは General Electric が West Milton, New York にある Knolls 原子力研究所の陸上用の SIG プロトタイプを海軍のために開発したものである。SIG は、高濃縮ウランを燃料としていたが、1955 春

¹⁶ 金属 Pu の融点は 639.5°C

¹⁷ Rickover は水冷却炉を使った Nautilus を 1954 に完成させていた。

から運転されて 1957 にシャットダウンし、Rickover 将軍は潜水艦推進に高速炉を用いることを放棄した。その短い運転期間中蒸気発生器でナトリウム冷却材の漏れ（複数）を経験していた。

アルゴンヌ国立研究所での増殖炉研究の統合

1946 年新設された AEC は全ての原子炉計画を ANL に統合した。兵器用 Pu 生産のためだけでなく、放射性同位元素の生産、一般研究、そして電力生産への広い関心があった。ANL 所長に任命された Zinn は発電炉の重要性を強調した。しかしウラン鉱のストックは、電力生産は云うまでもなく、少量の核兵器生産を辛うじて支える程度しかなかった。電力生産の唯一の望みは消費するよりも多くの核分裂物質を生産する増殖炉しかないと言っていた。Zinn は増殖炉に高い優先順位を与えるように説得し、自らが統率すると云った。Fermi は天然ウランからほとんど 100%の核分裂エネルギーを取り出すという目標を絶賛する講演を行って支援した。

EBR-I：アメリカ二番目の高速炉、液体金属冷却高速炉 EBR-1 (Experimental Breeder Reactor) の設計建設が認可された。EBR-I は Na-K 合金で冷却することになったが、この液体金属の材料への影響について多くが分かっておらず、制御棒が癒着したり腐食したりしないようにそれらを空気で冷却することにした。2つの全く独立な冷却系統という複雑な設計になったが、Na-K 合金は水、空気いずれとも反応するので、流体の漏れがあってはならなかった。

マンハッタン計画の当初から、シカゴ地区に原子炉を建設することの公衆安全の問題が持ち上がっていた。Zinn はこの計画は遠隔地で行われるべきであるとして AEC に立地探しを依頼し、Arco, Idaho の近くの海軍兵器庫として確保されていた場所が選定された。今それは Idaho National Laboratory (INL) の National Reactor Testing Station として知られている。

EBR-I は Pu 増殖と発電をともに行う最初の高速炉として設計された。1.2MWt のナトリウム冷却炉¹⁸は 1951/12 臨界、200W の電球を 4 つ灯したので、世界最初の発電炉となった (図 7.1)。引き続き EBR-1 全体に電力を供給した。最終的な出力は 1.4MWt, 0.2MWe。EBR-I は兵器級 (94%) ウラニウムを燃料としていた。1953 AEC は EBR が世界で初めてウランから Pu を生産することを実証したと発表。

この炉は正の即発反応度 (出力上昇が正のフィードバックを持つ) で設計されていた。1955/11 [冷却材の流れの変化] この不安定性にどう影響するかという実験の途中、部分的な (40-50%) 炉心溶融が起きた。破壊された炉心を取り除かれて修復され、1963/12 のシャットダウンまで運転された。

EBR-I の事故によって、液体ナトリウムに関連し

¹⁸ 結局冷却材が Na-K 合金から Na に変更されたように読める



Figure 7.1 Experimental Breeder Reactor-1. By illuminating four light bulbs

た安全性、特に炉心の部分熔解と崩壊によって爆発臨界になる可能性に注意が集められた。この可能性は最初 Bethe と Tait によって調べられたが、Bethe-Tait 分析は起こりえるエネルギー放出の程度について過剰に控え目であるとされている。

EBR-II (実験増殖炉 EBR-II)

62.5MWt, 20MWe、ナトリウム冷却の“プール型”炉（二次液体ナトリウムループへの熱交換器が原子炉容器に浸かっている）で、疑いなく US の最も成功した高速炉である（図 7.2）。ANL が設計し、1958/6 に Idaho 国立研究所の National Reactor Testing Station（現在の Materials and Fuels Complex）で建設開始、1961/9 にナトリウム冷却材抜きで低出力臨界に達した。1963/11 にナトリウム冷却材のある状態で臨界、1969/9 に定格出力達成。

EBR-II は当初高濃縮金属ウラン（HEU）燃料で運転され、ナトリウム冷却高速増殖炉が発電所に適していることを実証した。隣接して燃料を連続的に再処理するための燃料サイクル施設（FCF: Fuel Cycle Facility; 現在は Fuel Conditioning Facility と呼ばれている）があり、1964~1969 にかけて FCF の使用済み燃料が再処理されて新しい燃料が製造された。1967 FCF は実証炉から照射施設に役割変更された。

1983 に CRBR（Clinch River Breeder Reactor）がキャンセルされた後、BR-II と FCF は ANL の IFR（Integral Fast Reactor）を研究・実証するための施設となったが、IFR 計画は中止になり、EBR-II は 1994 にシャットダウンして、30 年間の運転の幕を閉じた。

EBR-II のシャットダウン作業には燃料を取り除いて一次・二次ナトリウムを排出させることが含まれている。FCF は燃料調整施設（Fuel Conditioning Facility）に役替えとなり、EBR-II の使用済み燃料を電気化学的に処理して自然の地質処分場に廃棄できる形の放射性廃棄物にする研究が行われることになる。この燃料は、熱伝導を良くするために、燃料ペレットと燃料棒の間にナトリウムを入れていたのだが、燃料棒に水が入ると水素が発生する。燃料調整の仕事は 2035 年までに完了することで Idaho 州との協定が結ばれている。

最初の商用炉 Fermi-1 の短命

Fermi 1 (Enrico Fermi Atomic Power Plant)

Fermi 1 は炉心、出力ともに当時最も大きなく高速炉（200MWt、66MWe、HEU 燃料、ナトリウム冷却）で、1963/8 臨界に達した。EBR-II との違いは、一次ナトリウム冷却から二次ナトリウムへの熱伝達が外部にある熱交換器で行われていることであった。

1966 炉心の一部でナトリウムの流れが妨げられて部分的な炉心熔融が起こった。Zr 板が外れて、ナトリウムの炉心への流れを妨害したのだった。105 個の内 2 個の燃料要素が熔融したが、原子炉容器の外には汚染が起こらなかった。この事故を題材にした「ほとんどデ

トロイトを失うところだった」本が書かれた。修復に4年かかった。1970/5には運転再開準備ができていたが、ナトリウム爆発が起こって7月まで運転が延期された。10月に炉の出力が最終的に200MWtに達したが、1971までの間に19.4GWh（稼働率3.4%）の電力しか生産しなかった。PRDCは運転を継続するためにウラン燃料を追加購入しようとした。1972/8 運転許可の延長が認められなかったことによって、シャットダウンに向かい、1972/11/27 運転停止、1972/11/27 廃炉決定され、1975/12/31に公式に廃炉された。

1960～1970年代の液体金属高速増殖炉

Fermi 1の失敗にも関わらず、LMFBR (Liquid Metal Fast Breeder Reactor)を開発して今世紀末に商用化することが目指されていた。1967までにはLMFBRはAECの最大の商用発電所開発計画となっていた。この目的を遂行するために、AECは10巻からなるLMFBR計画を発表した。この計画の目的は2つある；

1. R&Dを行って、必要な技術を獲得すること
2. 競争力のある自立したLMFBRを使って最大の進歩を確保すること

経済的に適正な商用LMFBRを1980年代半ばまでに開発することが目標であった。AECが1969に行った費用効果比研究では、LMFBRの商用化導入は1984年とされた。

エネルギー危機の高まりとともに、LMFBR技術を急速に商用化することが国の役目となってきた。カーター大統領が実証CRBR計画をキャンセルしようとしていた1977までAECの最高の開発計画でありつづけ、CRBR計画が議会で停止された1983まで優先度の高い計画であった。

1960年にケネディ大統領が10年以内にアメリカ人を月に送る計画をしたのと同じように、ニクソン大統領は1971/6のエネルギー教書の中で、最も優先順位の高いエネルギー計画として“LMFBRの実証を1980年までに完成すること”であるとした。この目標は議会の原子力両院合同委員会で裏付けされた。

Southeast 高速酸化物実験炉

1960年代MOXセラミクス燃料を使うことが始まった。SEFOR (Southwest Experimental Fast Oxide Reactor)は20MWtのナトリウム冷却MOX燃料高速炉でMOX燃料を使った炉の運転特性、特にMOX燃料にからむDoppler熱フィードバック係数の意味合いを調べるものだった。SEFORは電力を生産しなかった。SEFORの実験でMOX燃料を使うことに絡んだ反応度の負の温度係数は、燃料の温度が上昇するような事故では、高速炉の安全性を高めることが確認された。

SEFORは1969/5に運転を開始し、3年後にシャットダウンされた。燃料と照射されたナトリウムが取り除かれ、1972末に他の場所に運ばれ、いくつかの解体が行われた。原子炉はアーカンサス大学が取得し、現在も所有しているが、大学は一度もそれを運転したことはない。

高速中性子束実験施設 FFTR

現存高速炉(62.5MWtの EBR-II と 200MWt の Fermi 1) から一足飛びに CRBR(975MWt) のサイズにスケールアップすることはリスクが大きいと AEC は考えていた。そこでその中間サイズで燃料試験を目的とする炉が LMFBR 開発計画の中に組み入れられ、1967 FFTR (Fast Flux Test Facility) が認可された。FFTR (400MWt、ループ型ナトリウム冷却、MOX 燃料、Pu 増殖のためのブランケットなし) は \$87.5 million で建設し、1974 初頭に定格運転の予定であった。FFTR は 1980 に臨界に達したが、1981 に CRBR がキャンセルされるとその役割を失った。しかし高速炉の設計や運転に関わる種々の試験に用いられて延命したが、1993 は炉の停止が決定された。以後、医療用 RI 生産や兵器用トリチウム生産などを含めて利用の道が探られており、FFTR はコールド状態でスタンバイしている。

代替高速炉の概念

LMFBR が最も高い優先順位を与えられたが、ガス (He) 冷却増殖炉、2つの熱中性子型炉、軽水増殖炉、熔融塩炉など他のいくつかの増殖炉も考えられ、それぞれ種々の段階に開発された。

この中の最も興味ある代替は**熔融塩増殖炉**であろう。燃料と冷却材が熔融フッ化物の混合物として一体となって流れ、中間熱交換器を流れて炉心に戻っていく。この炉は第二次大戦後原子力航空機を設計する試みの中で最初に提案された。最初のプロトタイプ航空機用原子炉 1.5MWt の ARE (Aircraft Reactor Experiment) は 1954 に 100 時間運転された。第 2 のグラファイト減速 8MWt 熔融炉 (MSRE) は 1965/6~1969/12 の間運転され、熔融塩増殖炉の技術的な可能性が実証された。1972 ORNL は熔融増殖開発計画 (MSBR: Molten Salt Breeder Reactor) を提案した。総予算は 11 年間で \$350 million であった。しかし LMFBR への関与が深く進められていた時であり、AEC は ORNL の提案を却下した。増殖炉の開発計画の数を増やしたくなかったことと、熔融塩炉の増殖比が高速増殖炉の増殖比に比べて大きくなかったためである。1973/1 MSBR 開発計画は中止すべしとされたが、翌年再度復起して 1974 11 年間で \$720 million の計画を提案した。再度却下され、1976 には“予算上の理由で” MSBR 計画を停止するように指示された。

AEC の費用効果分析

LMFBR 計画について AEC は極めて楽観的な費用効果分析を行った。これらの分析は、在来原子炉に比べた LMFBR 建設費、電力需要の上昇率、ウランウムの入手可能性と値引き率などを含むいくつかの入力に非常に敏感で、短期的な投資と長期的な利益の重みに強く影響した。AEC は、

都合のよいしかし非現実的な仮定をして、費用対効果比を見積もっている。

そのような仮定には原子力発電の成長についての全く非現実的な目論見が含まれている。例えば図 7.5 に示すように、AEC の 1974 の見積もりでは 2008 年度のアメ리카の原子力発電総量はおよそ 2000GWe である。2000GWe というのは、2008 の実際のアメ리카の電力消費量のおよそ 4 倍である。実際のところでは、2008 のアメ리카の原子力発電容量は~100GWe、全電力の 20%である。

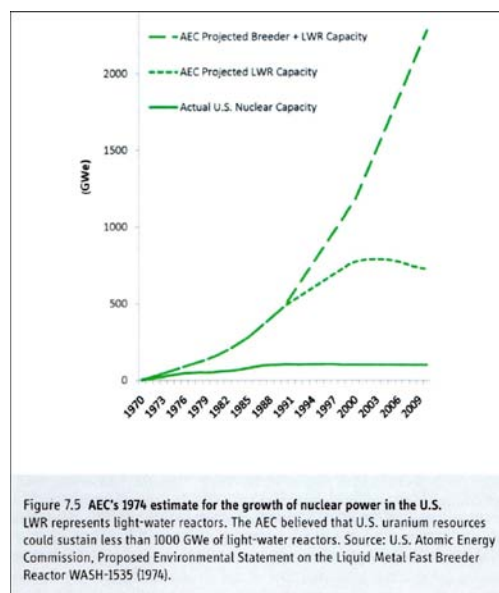


Figure 7.5 AEC's 1974 estimate for the growth of nuclear power in the U.S. LWR represents light-water reactors. The AEC believed that U.S. uranium resources could sustain less than 1000 GWe of light-water reactors. Source: U.S. Atomic Energy Commission, Proposed Environmental Statement on the Liquid Metal Fast Breeder Reactor WASH-1535 (1974).

クリンチリバー増殖実証炉の盛衰

実証炉 LMFBR の最初の法定上の建設許可が 1969 に下りた。CRBR はいくつかの電力会社と AEC (のちの DOE) の合同計画で、Westinghouse 電力が原子炉生産者として選ばれた。CRBR の建設は 1974 に始まり、1981 ないし 1982 に発電が行われる予定であった。

発電所は Oak Ridge (Tennessee) AEC のサイトのクリンチリバーの湾曲部に建設され、TVA が運転して、TVA 送電線に電力を供給するはずであった。CRBR は FFTF と最終的な商用プロトタイプ増殖炉の中間に位置し、設計出力は 975MWt (FFTF の~2.5 倍)、350MWe のナトリウムループ冷却、MOX 燃料 Pu 増殖炉である。

しかし LMFBR 特に CRBR プロジェクトは計画の当初から、経済性、核不拡散、安全性に関する公衆の政治的な強い反対を呼び起こした。1977/3 カーター大統領は、1976/10 のフォード大統領の決定を拡張して、アメリカでの商用再処理と Pu リサイクルを無期限延期した。CRBR に向けた限定的な作業のライセンスも延期した。

フォード大統領とカーター大統領の措置は、インドがアメリカの "Atoms for Peace" プログラム援助を受ける中で分離した Pu を核爆発に利用した (1974) ことに対応するものだったが、当時ブラジル、パキスタン、北朝鮮はフランスとドイツから再処理工場を購入する契約をしており、アメリカはこれらの国々が核兵器のために Pu を抽出することに関心を持っていると危惧したのである。

この核拡散への関心に伴って、増殖炉の緊急性が薄らいだ。アメリカの原子力発電の需要に関する AEC の見積もりと、アメリカのウラニウムは間もなく不足するだろうと云う見方は大きく誇張されているとカーター大統領は助言されたのである。

カーター執行部の反対にもかかわらず、議会は CRBR に資金を与え続けた。建設は進められなかったが、主な部品の発注が行われ倉庫に格納されていた。1981 レーガン大統領が CRBR の認可手続きを再開した。1982 末には設計がほぼ完了し、ほとんどの部品は手元にあるか或いは発注されていた。しかし 1983/10 議会は CRBR の 1984 会計年度の資金を削

減し、1983/12 原子力規制委員会は認可手続きを停止し、前の年に認可した限定的な作業のライセンス過程をも停止した。これによって、アメリカの増殖炉開発は事実上終了した。

集積型高速炉 (Integral Fast Reactor) と熱プロセッシング

クリンチリバー原子炉計画の終焉から抜け出るために、ANL の科学者たちは IFR を考え出した。EBR-II に倣って、IFR は Pu 増殖炉と同じ敷地に再処理・電解プロセス施設が統合され、Pu とマイナー超ウラン元素が分離されて新しい燃料にリサイクルされるもの。

IFR は増殖炉の経済性を向上させ、核拡散耐性を持たせ、環境的にも受容されるものとして提示された。しかし疑わしいこともあった。最も重要なのは、熱プロセッシングが在来プロセスより高価だと云うことだった。さらに、同じ敷地にある原子炉と再処理施設のそれぞれで数トンもの Pu にアクセス可能になる。超ウラン元素化学と Pu 金属冶金の訓練を受けた専門家ならホットセルの中で超ウラン元素から Pu を分離することができる。1992 の DOE と州の合同研究によれば、熱プロセッシング施設で純粋な Pu を生産する多様な方法が記述されている。

これらの問題にもかかわらず ANL は連邦政府の関心を 10 年間近く引き付けてきたが、クリントン政権は IFR 計画をキャンセルし、1994 議会は資金を停止した。議会との政治的な妥協として、EBR-II をシャットダウンさせる見返りに、燃料再処理計画は“アクチナイドリサイクル計画”と名を変えて資金を継続することが合意された。10 年後、この計画は長期的な核廃棄物処理処分に必要であるとして再度性格を変え、G.W.ブッシュ政権の GNEP の重点項目となった。

議会在 IFR 計画の資金を停止した後も、DOE は熱プロセッシング計画を FBR-II や FFTF の Na と結合した 3.35 トンの使用済み燃料を処理する方法として存続させ続けた。DOE は 2006 に熱プロセッシングによって残っている 2.65 トンのこの燃料を、処理と処分込みでおよそ \$88,000/kg で、8 年間かけて \$234 million で処理できると見積もった。

国際協力

今日の改良型の原子力発電所の R&D 経費は 1970 年代より少ない (第 1 章、図 1.1 参照)。そのためより国際協力が行われるようになった。

第 4 世代国際フォーラム (Gen IV Forum) : 2030 年以降の新世代の原子炉の設計を国際協力することに向けて US が 2001 に主導したもの。2002 にフォーラムは 6 つの型の炉を検討することにし、液体ナトリウム、液体鉛・ビスマス合金、ヘリウムで冷却される 3 つの高速増殖炉が含まれている。これまでのところ、炉設計、安全性、核拡散耐性、燃料製造技術、材料開発、その他について国際的な研究協力を集めて調整することに努力が集中されている。

INPRO (International Project on Innovative Nuclear Reactors and Fuel Cycles) : ロシアその他の US と原子力協力協定を結んでいない国々が Gen IV Forum から排除されてい

ることもあって、2001 に IAEA の決定によって始まった。これまでのところ INPRO は “Guidance for the Evaluation of Innovative Nuclear Reactors and Fuel Cycles” という報告と如何にして “革新的な核エネルギーシステム” に迫っていくかについてのマニュアルを産みだしている。

GNEP (Global Nuclear Energy Partnership): US と諸外国の核エネルギーを、核兵器拡散リスクと放射性廃棄物の長期的な地層処分の必要性を減少させつつ発展させることを目標に、2006 ブッシュ政権が提案。この目的のために、使用済み燃料が永久に隔離される **once-through** 利用を止めて、改良型核燃料再処理と高速中性子 “燃焼” 炉に基づいた閉サイクルを開発することが提案された。

GNEP 計画では、Pu 増殖するのではなく、高速炉で Pu やマイナー超ウラン元素を燃やして、長期にわたる地層処分を避けることを構想している。そのような高速炉と在来炉の数の比は転換比 (CR: 高速炉の中で超ウラン元素が生産される速度と壊される速度の比) に依存する。高速炉の設計によって転換比は広い範囲の値をとる。転換比が小さいほど燃焼炉の数は少なくてよくて、燃焼炉の数は $1/(1-CR)$ に比例する。GE の高速炉 PRISM の設計では CR=0.6 という値が最低値であると報告されている。ANL は CR=0.25 が達成可能であるとしている。CR が 0.25~0.6 の間であると仮定して、100GWe の軽水炉ごとに 40~75GWe の高速炉が必要である。

結論

液体金属冷却高速炉に固有の安全問題があるが、US で増殖炉が失脚したのはそれが主な原因ではないと思われる。より重要なのは、核拡散の問題と増殖炉は当分必要とされないか軽水炉に経済的に太刀打ちできないという確信がつのってきたことである。

GNEP の下、DOE は高速炉を燃焼炉と考える新しい方向に関心を寄せている。これまでのところこの新しい設計は多くは机上の研究であり、燃焼炉を設計することへの強い努力がされるかどうかの見通しは不確かである。オバマ政権は GNEP の環境影響プログラム (Programmatic Environmental Impact Statement) と DOE の高速炉商用化の動き、および廃棄物の燃料閉サイクルを止めた。この原稿執筆段階で、高速炉の R&D さえをも継続すべきかどうか議論されている。経済性と核不拡散の議論によって高速炉に反対する面が強い。