

# 原子力に夜明けは来るか？

地球温暖化とエネルギー需要の増大で、原子力が見直されている。しかし、原子力がエネルギー源として確固たる地位を占め続けるためには、さらに安く、クリーンで、安全なものにならないといけない。Declan Butlerが報告する。

原文：Energy: Nuclear power's new dawn

Nature Vol. 429(238-240)/20 May 2004; www.naturejpn.com/digest

— ユーヨーク州北部の原子力発電所。夜間の勤務時間である。運転技術者が炉心の温度をチェックした。800°C。21世紀初めなら、大パニックが起こるだろう。原子炉の部分的な溶融(メルトダウン)が始まっている恐れのある温度だからだ。しかし、この数字を見て技術者がまゆをひそめるようなことはない。現在は2035年で、この最先端の原子炉はこの温度で稼働するように設計されている。冷却材はかつての原子炉のように水ではない。巨大な容器に満たされた溶けた鉛で冷却されている。そして、この高い運転温度のおかげで、この発電所は電力だけでなく水素も生産しているのだ。

この将来像は、「第4世代原子炉国際フォーラム」(GIF)での検討内容をもとにしている。同フォーラムを構成しているのは、将来の原子炉計画を練っている10カ国だ。同フォーラムが検討している新型原発はすべて高温で運転し、効率が大幅に改善される予定である。さらに、安全性を高めるために機構が単純化されており、複雑なバックアップシステムや経験を積んだ運転員が必要ない。原則的には、すべての概念設計案が炉心溶融を起こさないように設計されており、事故時には自動的に冷却され、そのとき、人間の操作は必要とせずかだという。

これは、冷却材の循環を止めたり、電力の供給を絶つなどして、故意に事故を起こそうとしても無駄だということも意味する。原子炉がテロリストの標的になることは今より減るだろう。少なくとも、原子力産業界はそう期待している。

しかし、1979年には米国ペンシルベニア州スリーマイル島の原子力発電所で部分的な炉心溶融が起こる事故が起きた。1986年にはウクライナのチェルノブイリ原子力発電所で炉心が爆発して31人が死亡し、ヨーロッパ中に

放射性物質がまき散らされる事故が起こった。こうした記憶は消えていない。一般の人々は簡単には納得しないだろう。

スリーマイル島の事故以来、米国では新しい原子力発電所は建設されていない。だが今年3月、米国のエネルギー企業のコンソーシアムは、発電所建設への第一歩である認可申請を行うつもりであることを明らかにした。またフランスは4月、同国の59基の旧式原子炉を新しい原子炉に置き換えると発表した。アジア諸国は、エネルギー需要の急成長に対処するため、数十基の原子炉建設を計画している。これは、原子力の復活の始まりだろうか。

## 将来のエネルギー源？

原子力は二酸化炭素を出さない。温室効果ガスである二酸化炭素の放出量が増えている一方で、世界のエネルギー需要は2050年までに2倍になると予測されている。このため、原子力は検討に値する選択肢として見直され始めた。東京で開かれた第4世代原子炉国際フォーラムの2002年代表者会合で、米国エネルギー省(DOE)のSpencer Abraham長官は、このような点を理由に、ブッシュ政権が原子力を強く支持していることを説明した。「次世代原子炉を作るうえで直面するであろう技術的ハードルを、原子力分野の技術者た

ちが乗り越えることができれば、私たちは、安全で豊富で信頼でき、費用がかからず、核拡散にも強いエネルギーを持つことになる」とAbraham長官は話した。

原子力が復興するためには、原子炉は今よりずっと低コストで運転できなければならないだろうという点で専門家の意見は一致している。そして、原子力に反対している一般人たちの意見を変えさせるためには、次世代原子炉はテロリストに手が出せない施設にし、放射性廃棄物も今よりはるかに少なくしなければならないだろう。

そのような技術的挑戦は、一カ国で行うにはあまりに負担が大きすぎる。2001年、第4世代原子炉国際フォーラムの設立時の8カ国は、各国が研究で得た知見を共有することを決め、その後、将来の原子炉として最良と思われる6つの概念設計案を選んだ<sup>1</sup>(5ページの表を参照)。

米国エネルギー省原子力科学技術局長で第

GETTY IMAGES

▶ 4世代原子炉国際フォーラムの委員会の委員長も務めるWilliam Magwoodは、6つの概念設計案のうち、実現可能性検証段階を生き残り、建設とテストに1基あたり約10億米ドルかかると見積られる研究用原型炉に進むのはせいぜい3案だろう、とみる。

約300°Cで運転することが多い今日の水冷却炉と異なり、6つの設計案のすべてが510°Cから1,000°Cの温度で運転するように設計されている。これは、より効率的に熱を電力に変えるためだ。主要な設計案のひとつである超高温ガス炉(VHTR)は、既存の原子力発電所とくらべると同じ量の燃料から50%多い電力を得ることができる可能性がある。

しかし、通常の圧力下では、ふつうの水が使えるのは330°Cまでだ。このため、このような高い運転温度は、新しい冷却材が必要であることを意味する。第4世代原子炉国際フォーラムの設計案では、2案は炉の冷却に不活性なヘリウムを使う。残りの案は溶けた鉛やナトリウム、塩を使う。

もっとも人気のある第4世代原子炉概念設計案のひとつである超臨界圧軽水冷却炉(SCWR)は、最大500°Cの高温で水が沸騰するのを防ぐため、極端に高い圧力を使う。米国のアイダホ国立工学環境研究所(同州アイダホフォールズ)の超臨界圧軽水冷却炉システム統合責任者であるJacopo Buongiornoは「超臨界圧軽水冷却炉は炉の効率がよく、デザインが比較的単純なため、その建設費と運転コストはかなり安くなるだろう」と話す。実際、超臨界圧軽水冷却炉がもうまく動けば、理論上は石炭や天然ガスに負けない価格で電力を生み出せるだろう。既存の原子炉にくらべれば非常に安い価格となるはずだ。

### 熱で水素を生産

実際の経験という点から見れば、最先端の設計案は超高温ガス炉かもしれない。日本原子力研究所(本部・千葉県柏市)は、超高温ガス炉の一種である「高温工学試験研究炉」(HTTR)を茨城県大洗町に建設し、研究を行っている。この炉はヘリウムガスで冷却されており、4月のテスト運転で目標の950°Cに初めて達した。

原子炉の運転温度が約700–900°Cの高温になると、水を熱化学的に分解して水素を得るのに使うことが可能になる。エネルギー源

を主に石油に頼っている国の多くが、水素ガスを自動車や家庭用の電力に変える燃料電池の普及により、将来のエネルギー源は水素になると考えている。

米国では、水素エネルギーへ転換しなければ、輸送用のエネルギー需要だけで石油輸入量が2025年までに78%増えると思われている<sup>2</sup>。このため、米国エネルギー省は超高温ガス炉を第一の候補に選んだ。今後10年間の半ばまでに、アイダホ国立工学環境研究所に原型炉を建設するための11億ドルの予算を支出するエネルギー法案が、米国会に上程されている。しかし、エネルギー規制などの無関係な問題をめぐる議論で審議は遅れている。

アイダホ国立工学環境研究所の先進原子力部門長であるRalph Bennettはこう話す。「第4世代原子炉国際フォーラムは、輸送用エネルギーの供給における原子力の役割を分かっている。私たちはハードルが高くなることを承知のうえで、水素生産の実証をいくつかの原子炉デザインに含めた」

しかし、米国での輸送に必要なガソリンを完全に水素で置き換えようと思えば、100万キロワット級の原子力発電所を400以上作らなければならない<sup>3</sup>。現在、世界にある原子力発電所は441カ所にすぎない。

原子力産業界には高温炉へ移行することの利点に反論する者はほとんどいないが、概念設計案のうち、さまざまな問題をほらむルトニウム廃棄物の再処理に依存することなしに運転できるのは2つ(超高温ガス炉と超臨界圧軽水冷却炉)だけだ。

米国の環境圧力団体「憂慮する科学者同盟」(本部・マサチューセッツ州ケンブリッジ)の原子力技術者David Lochbaumは「すべての設計案には実証されていない工学技術が含まれている。持続する高温や連鎖反応による中性子の激しい衝突に耐える、新しい超高強度材料の開発も必要だ。そうした材料は、腐食を起こす反応物にも耐えることが必要な場合が多い」と指摘する。例えば、溶融塩炉では、ウラン燃料は循環する冷却材の中に溶かし込まれている。放射性物質漏れの可能性をなくすためには、腐食に耐える新しい材料が必要だろう。

Magwoodは「新材料の開発は、第4世代原子炉国際フォーラムの最大の課題のひとつになるだろう」と同意する。新材料開発のための

大規模な国際共同研究に向けて、フォーラムにはいくつかの計画がある。こうした共同研究により、多くの同じ問題に直面している核融合炉に役立つ材料も開発できるかもしれない。しかし、2005年夏まではいかなる決定もされないはずだ。フォーラム参加国は、6つの概念設計案についてどの国がどの研究をするかという計画を2005年夏にまとめ終えることになっている。

高温での運転のために、従来の燃料システムも使えなくなる。従来の燃料システムでは、ウランのペレットを金属棒に詰めるが、この金属棒がかなり低い温度で溶けてしまうからだ。ガスで冷却する炉では、日本の高温工学試験研究炉のように蜂の巣状の黒鉛の構造物の中に燃料ペレットを入れるか、ペブル(丸い小石の意)といわれるビリヤード球サイズの黒鉛の球に入れて燃料ペレットを保持することになるだろう。

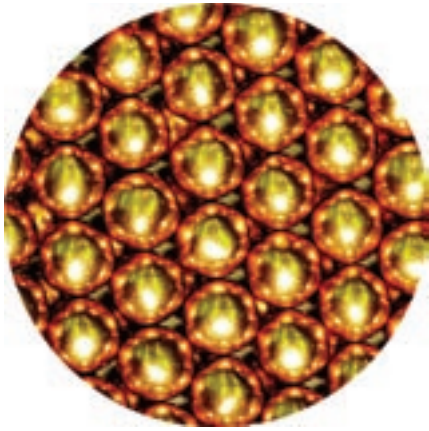
### いくつものハードル

ペブルベッド炉では数百万個のビリヤード球が炉に充てんされ、熱を取り除くための冷却ガスがそのすき間を流れる。球は原子炉の底部からたえず取り除かれ、自動的に並べ換えられる。ほとんど燃料を消費したものは廃棄物の流れに送られ、いくらか燃料が残っているものは原子炉の上部に戻される。

ペブルはそれ自体が小さな原子炉だ。燃料でできた芯を、中性子の速度を落として連鎖反応を制御する黒鉛層で包んである。これが超高強度のセラミックス層で覆われていて、あらゆる核分裂生成物を中に閉じ込める。このため、原則的には事故事象時にも放射性物質の漏れは起こらないはずだ。

米国テネシー州にあるオークリッジ国立研究所は、1970年代にペブル研究に取り組んだ。当時は、かつて核兵器に使われた水素の同位体、三重水素の生成源として高温ガス冷却炉が研究されていたからだ。しかし、当時の燃料ペブルは1,000個につき1個が欠けているか、被覆が不完全だった。これは現代の原子炉では容認できない欠陥だ。

第4世代原子炉設計案のすべてが同様の技術的ハードルに直面している。フランス原子力庁(CEA)のAlain Bugat長官は「基礎研究が不足している分野がいくつもある。これは長期にわたる研究だ。もし、2030年までにい



燃料ボール：このペブルはそれ自体が「ミニ原子炉」で、次世代原子力発電所の燃料として使われるかもしれない。

くつかの設計案について稼働する試作炉ができていたら、うまくいっているほうだといえるだろう」と話す。

第4世代原子炉の開発が成功しなければ、原子力産業は、世界の電力の17%を供給している現在の地位を維持することに必死になっていることだろう。マサチューセッツ工科大学(MIT、同州ケンブリッジ)の科学者と経済学者のグループが昨年発表した研究は、2050年までに原子力による発電量が3倍になる可能性を調べた<sup>4</sup>。これは、二酸化炭素の予測排出量に明確な影響をおよぼすのに必要な発電量である。この研究グループは、コストの上では新しい原子力発電所は石炭や天然ガスに勝てないだろう、と結論づけた。世界的に多くの電力市場が規制緩和されつつあり、これは原子力産業への国家からの補助金が減少することを意味する。

新型の原子力発電所が相当数作られるのは、第4世代原子炉のコストを現在の設計案の4分の3にすることができた場合か、化石燃料に高い二酸化炭素排出税が課せられた場合のみだろう、とMITの研究は予測した。高い炭素税が課される見込みは低いとみられるのでコスト削減が不可欠だ。

しかし、見通しはどこでも悲観的なわけではない。国際エネルギー機関(IEA、本部・パリ)の原子力アナリストPeter Fraserは「2025年までに予想されている原子力の成長のほとんどは東アジアだろう。特に、中国、インド、韓国、日本の4カ国に集中する」と話す。この4カ国で、世界に新設される原子力発電所の85%以上を占めるだろう、とFraserは予測する。

アジア諸国が建設しようとしている原子炉の大部分は第3世代だ。これは現在の第2世代原子炉の改良版だが、安全性を高めるために複数のバックアップシステムを持ち、安価でシンプルなデザインで誤作動する部分が少ない。

しかし、新しい発電所が運転し始めるよりも、古い発電所の閉鎖の方が多いので、世界の原子力発電量は2025年まで減少する可能性が高い。フランスは例外国のひとつだ。フランスは電力の80%を原子力から得ており、30億ユーロ(約4,000億円)を投じて老朽化した発電所をパリに本社をおく仏独合弁企業「フラマトムANP」が製造する第3世代原子炉に置き換え始める計画だ。

フランスや日本などの国は、エネルギーの独立性を維持したいと考えているため、発電

所を新型炉に交換する決定の理由は、主に政治的なものだ。そして、それにまつわる経済のバランスは常に変化している。2025年までに、新しいエネルギー技術が原子力をしのぐようになるかもしれない。「私たちは、太陽エネルギーのコストが劇的に下がることを期待している」とFraserは話す。

太陽エネルギーのような技術は、小さな発電所で分散した電力生産を行うという現在のすう勢にも合っている、とFraserは指摘する。さらに将来は、天然ガスや石炭を使った発電所から出る二酸化炭素を減らす技術も開発されるかもしれない。

原子力産業は、こうした急速に変化する世界の環境に適応していかなければならない。第4世代原子炉国際フォーラムが、すばらしく安全でクリーンな原子炉を開発できたとしても、競合する技術とくらべて明らかに安価でない限り、数十年先ではあるだろうが、原子力産業は現状を維持するだけでやっとという状況に追い込まれるだろう。原子力が新たな夜明けを迎えるまでには、早朝のジョギングを相当しなければならぬようだ。 ■

Declan Butlerはネイチャーのヨーロッパ担当記者。

1. *A Technology Roadmap for Generation IV Nuclear Energy Systems* (US DOE NERAC/GIE, Washington DC, 2002) online at [http://gif.inel.gov/roadmap/pdfs/gen\\_iv\\_roadmap.pdf](http://gif.inel.gov/roadmap/pdfs/gen_iv_roadmap.pdf)
2. *International Energy Outlook 2004* (US DOE, Washington DC, 2004) online at <http://eee.eia.doe.gov/oiaf/ieo>
3. Grant, P. M. *Nature* **424**, 129–130 (2003).
4. *The Future of Nuclear Power* (MIT, Cambridge, MA, 2003).
5. *Nature* **427**, 661 (2004).

## 6つの第4世代原子炉概念設計案

第4世代原子炉国際フォーラム(GIF)は、米国、アルゼンチン、ブラジル、カナダ、フランス、日本、韓国、南アフリカ、スイス、英国からなる

	冷却材	温度(°C)	圧力	廃棄物リサイクル	出力エネルギー	研究課題	最短の実現可能時期
ガス冷却高速炉	ヘリウム	850	高圧	行う	電力と水素	耐放射線照射材料、ヘリウムタービン、新燃料、炉心設計、廃棄物リサイクル	2025年
鉛合金冷却高速炉	鉛・ビスマス	550–800	低圧	行う	電力と水素	耐熱材料、燃料、鉛の取り扱い、廃棄物リサイクル	2025年
熔融塩炉	フッ化物塩	700–800	低圧	行う	電力と水素	熔融塩化学と熔融塩の取り扱い、耐熱・耐腐食材料、再処理サイクル	2025年
ナトリウム冷却高速炉	ナトリウム	550	低圧	行う	電力	安全性、コスト削減、放射性燃料製造、再処理サイクル	2015年
超臨界圧軽水冷却炉	水	510–550	超高圧	オプション	電力	腐食と圧力、水化学、超高強度・非脆性材料、安全性	2025年
超高温ガス炉	ヘリウム	1,000	高圧	行わない (廃棄物はそのまま保管場所に移される)	電力と水素	耐高温燃料と耐高温材料、事故事象時の温度制御、高燃焼度	2020年