新しい軽水炉技術

Next Generation LWR Technology

尾本 彰

Akira OMOTO

◎1948年12月生まれ

◎1972年東京大学工学部原子力工学科卒業。東京電力(株)入社、現在
原子力建設部副部長。研究・専門テーマは原子炉安全

◎東京電力(株)(〒100 東京都千代田区幸町1-1-3)

水が核分裂により発生した高エネルギーの中性子を、ウランの核分裂にとって都合のよい熱中性子へと効率的に減速させる水素原子を豊富に有していたのは幸いだった。ほかにも黒鉛、重水という有力候補はあるが、豊富かつ使いやすい水を原子炉で中性子の減速材として用いてコンパクトな原子炉をつくり併せて燃料の冷却材として使うことで既存のボイラタービン技術を応用できた。かくして人類は極めて短時間のうちに軽水炉発電という新しくかつ経済的な技術を実現できた。

今日、この技術の過去30余年にわたる経験を踏まえ、新しい時代の要請に答えるべく次世代の軽水炉にむけた技術開発が先進各国で始まっている。その動向と要素技術を紹介する。

1. 軽水炉発電の現在

軽水炉発電技術は、ウランによる核分裂の発見から約20年を経てアメリカで完成され、以降30年を経た今日、全世界で300基を超す軽水炉による発電がエネルギー供給の重要な一部を支えている。国内でも約50基の発電用軽水炉で全電力供給の約1/3を賄うに至っているが、この電力供給全体に占める割合はエネルギー資源の国外依存度の高い先進国の間ではまだ低い部類に属する。

原子力発電は、資源論的にも地球環境問題の視点からも今後そのエネルギー供給上の戦略的重要性は高いものの、先進各国においては電力需要自身の低迷や新規立地の困難等から、今日そのシェアの増加はいたって緩慢である。一方、中国を初めとするアジア諸国では工業化に際して原子力に

よるエネルギー供給を期待する声が高い⁽¹⁾。

2. 次世代軽水炉設計への要求仕様

21世紀初頭以降の発電用軽水炉に対する電力供給あるいはエネルギー戦略の視点からの要請は、世界的にも米国EPRI(電力研究所)によるALWR Requirement Document⁽²⁾や欧州電力のEuropean Utility Requirements⁽³⁾等で提示されている。国内でもすでに次世代炉の一部とされているABWR(Advanced Boiling Water Reactor)に対してさらにその改良発展を企画するにあたってのRequirement⁽⁴⁾などが整備されている。

これらがほぼ共通して指向しているものは、

- (1) 運転保守の負荷の軽減 (User-Friendly, Operator-Friendly)
 - (2) 代替発電方式に対する経済的優位性 (Consumer-Friendly⁽⁵⁾)
 - (3) 信頼性、安全等に関する性能向上 (Neighbour-Friendly⁽⁵⁾)
 - (4) 燃料サイクル上での柔軟性確保
- である。将来の社会における技術と社会とのよりよい調和を指向したものといえる。

3. 次世代軽水炉設計における二つの型

この要求を満足する原子炉設計概念には、大きく見て進化型と受動安全型の二つの流れがあり、全体として前者は140~150万kW程度の大型炉、後者は60万kW程度の中型炉である。これを最も典型的に示しているのがアメリカの

ALWR 戦略で、この二つの型を個別に追及した設計および開発実証試験を行ってきている。原子炉の基本的な安全機能のうち例えば核反応停止について、軽水炉では従前より、過剰な核反応に対して燃料特性として自己抑制機能いわゆるドブラ効果を持つ等、自然の原理に従っておのずと安全が保たれるべく設計が追及され実用化されてきた。受動安全とは、外部動力を必要とする動的機器であるポンプや制御系をできるだけ排除しつつ、いっそう上記の特性を高めることを指向したものである。設計例として重力落下とか蓄圧を利用した非常用炉心注水系や格納容器冷却系

図1 AP 600 受動格納容器冷却系

図2 Siemens 社 BWR 1000 の受動式圧力トランスミッタ

(図1⁽⁶⁾)、さらには原子炉水位に依存した形で除熱機器や安全機器を機能させるパイロット弁の作動システム(図2)が挙げられる。このように熱水力分野における新たな受動安全技術の発展が顕著である。受動安全を最も包括的に取入れた軽水炉として1980年代半ばに提起されたのが PIUS⁽⁷⁾(図3)であった。一方、進化型炉にあっても、既存の技術での運転経験を重視しつつコストをコントロールしながら漸次改善を取入れるなかで、崩壊熱による蒸気のみで動力を依存する原子炉非常用注水系(図4)や蒸気凝縮熱伝達による格納容器冷却方式など、外部動力への依存性を避けた安全設計も採用が検討されている。また、受動安全炉では受動安全系を積極的に採用し

図3 PIUS 原子炉の受動核反応停止系炉心再循環
流量は、通常時圧力容器内の密度ロック（自然循環力を相殺するように再循環ポンプの吐出圧力をループにかけて、ポンプが運動中にはロック部から外部の水が侵入しないようにしている）されたループを流れ、ポンプ停止に際しては圧力容器内のほう酸水がループ内に侵入して反応を停止させる。

図4 改良形隔離時冷却系

運転員にも理解しやすく単純化をはかり、かつ従来の外部動力による安全系を削除ないし一般グレード化して経済性を追及しようとする意図がみられる。一般には受動安全機器には運転経験が少ない、駆動力が弱い、機器が大型化する等の傾向がみられ経済性を損なう可能性も考えられるが、発電用中型原子炉を受動安全原則にたって設計することは、大型原子炉建設に伴う経理的リスクを回避しつつ、新しい装いの原子炉により安心感を公衆にアピールする必要のある⁽⁸⁾米国電力の経営環境には適合するとも見られる。

4. 原子燃料サイクルへの考慮

15～18 箇月という長期運転サイクルを達成して稼働率を向上させる、あるいは燃料の高燃焼度化をはかることで、経済性をいっそう改善することは、既に現在の軽水炉でも世界的に進められ、次世代炉でもこの傾向が追求されている。また、原子燃料のワンスルーを指向せず再処理によるプルトニウムおよびウランの回収と核分裂生成物のこれら有用物からの分離という戦略をとる日本やフランスにあっては、高速炉が実用化するまでの間、過渡的にプルトニウムの軽水炉での利用が図られるが、次世代炉では燃料サイクル上の柔軟性を高める観点から、この場合の制御能力をいっそう高める試みも検討されている。また、ウラン資源の軽水炉での利用率を高める観点から、ウラン 238 の核分裂物質への転換比を高めるいわゆる高転換炉の研究も進められてきている⁽⁹⁾。炉心構造物以外は既存の軽水炉からの変更を最小限に抑えつつ転換比を現在の軽水炉の 0.6 から 0.8～1.0 程度に改善するものである。

5. 超臨界圧炉

水は臨界点 (221 気圧) 以上の高圧において相変化がなく単相として扱うことができシステムの簡素化と高効率化を図れるとの利点がある。この観点から化石燃料火力の超臨界ボイラ同様、超臨界圧原子炉を設計する試みが進められている⁽¹⁰⁾。タービン条件の改善から現在の軽水炉では 34% 程度でしかない熱効率を 42% 程度にでき

ると試算されているほか、炉水再循環系のない直接サイクルで経済性向上につながる小型軽量化が進むと考えられている。実現にあたっては材料工学の分野で原子炉級高温材開発が必要と考えられる。

6. おわりに

電力市場の自由化という事業規制緩和の流れの中で、欧米では電力会社間あるいは電源間の競争環境が強まっている。かつてアメリカでは軽水炉による商業原子力発電の黎明期^{れいめい}にあって燃料であるウランが豊富かつ低廉なことから「もはや電気はただ同然の時代がくる」とのフレーズがちまたに流れた時代もあった。その後、先進国では商業原子力発電の定着はみたものの経済性、立地難、廃棄物処分といった問題に達し原子力開発に困難がみられる国も出てきている。こうした中で次世代軽水炉開発が革新的な技術やアイデアの創造を触発し、原子力が再び人類が夢を託し人と環境に優しいエネルギー源として再活性化するよう関係者の努力が期待される。

文 献

- (1) Zao Ren Kai, Chinese Commercial Nuclear Power Program, *ICONE-3*, 1 (1995-4), 7-10.
- (2) Santucci, J. ほか, USALWR The Challenge of Achieving Utility Requirements, *ARS94*, (1994-4), 903-910.
- (3) Board, J.A., The European Utility Requirements for the Next Generation of Nuclear Plant, *Nuclear Engineering International*, (1993-11), 37-40.
- (4) 尾本・ほか, ABWR Evolution Program, *ANP-92*, (1992-11), 2-3.
- (5) Bacher, P., Towards Next Generation Reactors in Europe, *ICONE-3*, 1 (1995-4), 3-6.
- (6) Hochreiter, L.E. ほか, Integral Testing of the AP 600 Passive Emergency Core Cooling Systems, *ARS94*, (1994-9), 991-1004.
- (7) Hannerz, K. ほか, The PIUS PWR, *ANS Winter Meeting*, (1989-11), 559-560.
- (8) Bisconti, A.S., Gaining Public Acceptance for New, Advanced Nuclear Energy Plants, *ANS Meeting* (1990-6), 259-260.
- (9) 日本原子力学会高転換軽水炉研究専門委員会編, 高転換軽水炉の研究と展望 (1991), 日本原子力学会.
- (10) 岡・ほか, Conceptual Design of a Supercritical-pressure Direct-cycle Light Water Reactor, *ANP92*, (1992-11), 4-1.

(原稿受付 1995 年 4 月 19 日)