連載
講座軽水炉プラント
—その半世紀の進化のあゆみ第6回 軽水炉の改良研究(BWR)
—ドレスデンから敦賀1号炉へ

東芝 星出明彦, 前川 治

I. 米国における BWR 発電プラントの開発

アイゼンハワーの1953年12月「Atoms for Peace」の国連演説により、米国内においても原子力平和利用の動きが活発になった。米国の代表的重電メーカである GE 社はそれまでも原子力の分野で活動していたが、アルゴンヌ国立研究所(ANL)の沸騰水型原子炉 BORAX がその年運転を開始し、BWR の運転の安定性、安全性が実証されると、実用機への応用を真剣に考えるようになった。

1. GE 社の原子力発電プラント開発への転換

GE 社内でも1954年、原子力開発をいかに進めるべきかの研究グループを立ち上げた。研究グループは原子力発電を GE 社が商業的に参画すべき分野であると結論を出したが、炉型の選定が問題になった。BORAX の結果から、安全性が実証され、経済的にも BWR に期待ができ、先行されている PWR に対しても十分太刀打ちできると考えた。GE 社は将来の原子力製品構成に BWR を選定することを決断した。

1955年5月、米国原子力委員会(AEC)から BWR の実験炉となる EBWR(20 MW_{th}, 5 MWe)計画が公表され、GE 社はこの実験炉の製作に参画し、翌年12月には発電に成功している。同年7月には、コモンウェルズ・エジソン社は BWR 実証炉(192 MWe)を建設すること

を決定し、GE 社にターンキー(完成後受渡し)契約として発注した。初めて純民間資金で建設した商用原子力発電所である。当時200 MWe 規模の発電プラントは非常に大きい設備であり、実証炉建設は両社も必ずしも成功するとは確信できない大計画であった。

実証炉を受注した GE 社はこの頃までには軍用方面を含め40基近くの各種原子炉の製作実績をもっていたが、BWR を独自に建設して経験を積んでおくことが必要であると考え、1956年に社内の原子力発電組織をニューヨーク州スケネクタディからカリフォルニア州サンノゼに移動させ、原子力機器製造工場と、近くのバレストスに原子力研究所を建設した。バレストス原子力研究所には BWR の原型炉となる VBWR(5 MWe)を主に BWR 燃料の開発を進める目的で設置したが、実証炉の多くの設計、運転員の訓練や技術者の養成にも利用された。VBWR は1957年10月にコモンウェルズ・エジソン社のグリッドに送電を開始し、AEC の発電炉認可第1号を受けている。

2. ドレスデン原子力発電所1号機の設計と運転

ドレスデンプラントは電気出力192 MWe で設計され、1956年5月に着工、1960年8月に商業運転に入った。第1図にプラント全体の鳥瞰図を、第1表に BWR のシステム構成を示す。負荷追従性を持たせる目的から

LWR-Plants - Their Evolutionary Progress in the Last Half-Century—(6): Development for the BWR Type Nuclear Power Plant in the USA and Japan; From Dresden NPP to Tsuruga-1 NPP: Akehiko HOSHIDE, Osamu MAEKAWA.

(2008年 1月17日 受理)

各回タイトル

第1回 原子力発電前史

第2回 軽水型発電炉の誕生

第3回 日本の研究用原子炉の始まり

第4回 日本の原子力発電の始まり

第5回 米国および日本の軽水炉の改良研究(PWR)

— SHIPPING PORT から美浜1号機まで

第1図 ドレスデン原子力発電所1号機 プラント鳥瞰図⁷⁾

第1表 BWR のシステム構成と代表プラント

サイクル			システム構成	プラント名	電気出力 MW _e (Gross)	完成年	シリーズ
直接 サイクル	自然 循環 型	単一 サイク ル		EBWR (米国、ANL) VBWR (米国、GE 社) フンボルトベイ (米国) JPDR-I (日本)	5MW _e 5MW _e 65MW _e 12.5MW _e	1956 年 1957 年 1963 年 1963 年	— — BWR/1 —
	強制 循環 型	二重 サイク ル		ドレスデン 1 号 (米国) ガリリアノ (イタリア) グントレミンゲン (独) JPDR-II (日本)	215MW _e 164MW _e 237MW _e 12.5MW _e	1959 年 1964 年 1966 年 1972 年	BWR/1 BWR/1 BWR/1 BWR/1
		単一 サイク ル		ビッグロックポイント (米国) オイスタークリーク (米国) ナインマイルポイント (米国) 敦賀 1 号 (日本) ドレスデン 2 号 (米国) 福島第一 1 号 (日本)	75MW _e 650MW _e 630MW _e 357MW _e 832MW _e 460MW _e	1963 年 1969 年 1969 年 1970 年 1970 年 1971 年	BWR/1 BWR/2 BWR/2 BWR/2 BWR/2 BWR/3 BWR/3
間接 サイクル	自然循環型			エルクリバー (米国)	22MW _e	1964 年	—
核過熱炉				BORAX-V (米国) BONUS 炉 (米国) VESR (米国) パスファインダー (米国)	2MW _e 17MW _e 0MW _e 62MW _e	1961 年 1964 年 1965 年 1966 年	—

熱交換器を備えた二重サイクルと呼ぶシステムを採用した。その後建設したインドのタラプール、イタリアのガリリアーノ (SENN)、西ドイツのグントレミンゲン (KRB) など、他の二重サイクルプラントのモデルとなった。

ドレスデン 1 号機は、運転開始当初、制御棒や燃料被覆管の材料面での不具合が発生したが、B₄C を充填した制御棒に改良された後は良好な運転成績を残し、原子力発電の実用性を実証していった。1961 年の非常に厳しい冬には、石炭火力の石炭が凍り付き、運ぶのも燃やすのも苦労していたとき、ドレスデン 1 号機はフルパワーで発電し続け原子力発電の良さを見せ付けた。1962 年には 73% の稼働率を記録するとともに米国の原子力発電所で初めて累積 20 億 kWh に到達し、原子力発電が優秀なエネルギー源であることを証明した。

3. 商用 BWR 発電炉の改良研究と GE 社の取組み

1957 年の SHIPPINGPORT (PWR)、1960 年のドレスデン 1 号機 (BWR) が運転を開始し、国内の電力網に接続されると軽水炉は技術的には大きな成功を収めた。しかし、経済性では火力発電に太刀打ちできるには至らず、経済的にも火力発電に勝る大型炉が必要であることが強く認識された。1960 年に至り、AEC は 1968 年までに経済的で実用的な原子力発電を実証すること、そして長期的には経済的な増殖炉を実現するという 2 つの目標を掲げた。

GE 社は 1958 年にはオペレーション・サンライズ計画と称する開発戦略を発表し、経済性を追求した BWR 発電プラントの開発に乗り出した。そして、ドレスデン 1 号機に続く BWR 発電プラントに新たな設計要素を織り込んで実験を行い、改良のためのデータを蓄積した。

(1) ビッグ・ロック・ポイント原子力発電所

現在の BWR と同じ強制循環・直接サイクルの BWR として設計された。(第 1 表、第 3 図(a))特に、負荷追従に関して再循環流量制御方式を採用し、二重サイクルシステムの蒸気発生器を不要とする設計を指向した。大出力の原子炉を目指して設計データを採取するため、高出力密度の 45 kW/l と 60 kW/l の 2 種類の異なる炉心で運転が行われた。被覆管材質や燃料ペレットの仕様異なる燃料も試された。初めてコンピュータを使用して制御棒の最適配置による炉心出力分布の最適化や燃料の燃焼度管理が行われるようになった。また、圧力 (800~1,500 psig)、流量 (定格 60~100%)、出力を変えて運転特性データが採取された。この時代に AEC がスポンサーとなって軽水炉の経済性最適化のための評価が行われ、BWR の炉圧は 1,000 psig が最適であることが検証されている。

(2) フンボルト・ベイ原子力発電所

プラントを極力単純な構成として、建設費の低減を目指した改良を取り入れた。炉心での冷却材の循環方式を自然循環として、外部の循環ポンプおよび循環配管をなくし、気水分離器を圧力容器内蔵型にした。また、格納

第2図 フンボルトベイ原子力発電所 プラント断面配置図⁷⁾

容器内に圧力抑制システムを採用して格納容器の容積を大幅に小型化した。タービン発電機は屋外に設置された。(第1表, 第2図)この発電所の発電単価は8.5ミル/kWhであって, 同じカリフォルニア北部に建設する火力発電所の発電単価と同じにすることが設計の目標とされた。

4. 大型化に向けた技術開発

ドレスデン1号機の運転により BWR 発電所の優秀さが証明された。その後, ビッグ・ロック・ポイントやフンボルト・ベイの原子力発電プラントで高出力密度化やシステムの単純化などの設計改良が加えられ, 在来火力と経済的に太刀打ちできる高出力でより単純, コンパクトな大出力 BWR が設計されるようになり, 1963年オイスター・クリーク (650 MWe) 原子力発電所が発表されると画期的なブレイクスルーとして大きな反響を呼んだ。これを契機に以後, ナイン・マイル・ポイントに始まり, ドレスデン2号機, 3号機等, 次々と BWR 原子力発電所が発注され建設が開始された。

(1) オイスター・クリーク発電炉

GE 社は1963年に至り, BWR の標準炉としてオイスター・クリーク (650 MWe) 原子力発電所を火力発電所の発電コストに十分対抗できる原子力発電プラントとして世に問うた。これを BWR/2 と称し BWR を標準化し, 野心的なオファーを公表した。それまでのドレスデン1号, ビッグ・ロック・ポイント, フンボルト・ベイ等の BWR は BWR/2 に対し BWR/1 と称せられるようになった。BWR/2 は格納容器 (Mark-I 型) に初めて圧力抑制室を採用し大幅な小型化を図っている。再循環ループは 100~120 MW 当たり 1 系列の外部ループを設けることにした。敦賀1号機 (357 MWe) はこのオイスター・クリークをリファレンスプラントとしており, 再循環系は出力に比例して 3 ループとなっている。(第3図(b), 第4図)

Mark-I 型原子炉格納容器は, 原子炉圧力容器および再循環回路を取り囲むフラスコ型の鋼製のドライウェルと圧力抑制系 (ウェットウェル) から構成される。圧力抑制系は円環型の圧力抑制室とこれに連結するベント管, ベントヘッドおよびダウンカムからなる。

第4図 BWR/1とBWR/2,3の圧力容器の大きさ比較⁸⁾
(出力200 MWe で同一のプラントで比較した場合)

第3図 原子炉圧力容器構造を示す鳥瞰図

一方、炉心に関しては、熱水力学的分野の研究の進歩により、熱出力上限の予測式(限界熱流束相関式)の精度が向上し、従来設計における過度の保守性が見直された新しい設計基準の採用により出力密度の向上が可能となった。さらに、プロセス計算機の積極的採用により最適な制御棒配置が設定できるようになり、可燃性毒物を使用して初装荷燃料の反応度を抑制する技術など、炉心内の出力分布の平坦化を進めて高出力密度化、高燃焼度化が図られるようになった。単機出力の増大と燃料サイクル費の低減が達成され、建設単価、発電単価の大幅な向上に寄与したことが挙げられる。

(2) ドレスデン 2 号機発電炉

GE 社はオイスター・クリークからわずか 1 年遅れの 1966 年 1 月に、BWR/3 の初号機ドレスデン 2 号機を着工した。BWR/3 は出力によらず再循環ループを 2 本に抑えようとする野心的なものであった。福島第一 1 号機はこれをリファレンスプラントとして建設された。これは压力容器内にジェットポンプを設置することにより再循環ポンプの流量を数倍に増加させようという計画で、再循環ポンプはジェットポンプの駆動水を供給するため従来よりも数倍の吐出圧力を必要とし、所要動力は増加したが、外部循環流量が数分の一に減少したことにより再循環ループ配管系の経済性向上に役立った。また、これにより格納容器の大きさを小さくすることが可能となった。その結果、再循環 1 ループ当たりの電気出力は約 120 MWe から 250~500 MWe まで大幅に増大し、発電所建設費の低減に著しい影響を与えた。原子炉压力容器に多数の大口径ノズルを設ける必要をなくし、再循環ループに破断事故が生じたとしても炉内水位の保持に対する信頼性向上に役立ち、さらに事故時の原子炉冷却材の自然循環能力が増加するという特徴をもっている。(第 3 図(c), 第 5 図)

II. 日本の原子力発電炉の開発研究

1. 日本の原子力研究と産業基盤の進展

原子炉に関する研究は 1955 年、日本学術振興会に設置

された「原子炉設計の基礎研究委員会」に始まる。これに民間企業も参加して、国産 1 号炉と呼ばれた天然ウラン重水炉の実験用原子炉 JRR-3(1962 年臨界)の設計研究に着手した。東芝においても、1955 年社内外との協力連携の体制を整え、原子力基本法、原子力委員会設置法など原子力三法が施行された 1956 年、本社に原子力事業開発部を開設して開発体制の一步を踏み出した。原子力の研究は、鶴見研究所およびマツダ研究所に専門組織を設置した。

動力用原子炉については日本で十分な資料が得られなかったが、同年 6 月から将来の電力資源確保に熱心であった東京電力(株)と共同研究会を結成し、原子力平和利用国際会議の資料や AEC レポートなどをベースに発電所設計の研究に着手し、他の電力会社もそれぞれメーカーと組んで同様な研究に入った。

同 1956 年、国内民間機関としては、(社)日本原子力学会、(社)日本原子力産業会議が設立され、米国の原子力産業会議に加盟して多種の海外情報を集め、専門部会における調査研究や海外専門家による講演会、国内動向の把握と会員への資料・情報提供等が行われ、これを基に勉強会を始めた。他方、国の原子炉関連機器に関する研究助成金によりメーカーでは、原子炉容器、ポンプ、熱交換器、弁、計測制御機器等の試験研究が開始された。

当時、原子力開発のためそれぞれの重電メーカーを中心に原子力発電 5 グループが結成された。1958 年 9 月には三井グループとして日本原子力事業(株)(NAIG)を創立し、東芝、IHI を中心に原子力部隊へ人材を集結させた。そして、NAIG を中心に国の計画として進められた研究炉や実験炉の建設に参加していった。1959 年には科学技術庁の補助金を受け、社内研究用に東芝小型研究用原子炉(TTR:1962 年臨界)を建設し、炉物理、放射化学、遮蔽、原子炉の運転制御、雑音解析等の研究を進めた。引き続き臨界集合体(NCA:1963 年臨界)を建設し、炉心解析技術の向上に役立てるなど動力炉開発の準備を整えた。

2. 原子炉、動力炉の建設、国産化に向けた取り組み

我が国の動力炉の建設は、日本原子力発電(株)により 1959 年英国型ガス炉の発注に始まるが、その頃、米国において開発されていた軽水炉が将来有望であると考えられたところから、日本原子力研究所が軽水炉の動力試験炉(JPDR)を導入する計画が持ち上がり、1960 年には GE 社に発注することが決定された。JPDR は熱出力 45 MWth、電気出力 12.5 MWe の自然循環型の BWR 発電プラントである。主な建設目的としては、原子力発電所の建設・運転・保守の経験を得ること、動力用原子炉の特性把握、研究開発等を通して国産化に資する等が挙げられた。JPDR の建設では電力、メーカーなど多くの技術者の参加を得て、また、機器の供給を通し、多くの経験

第 5 図 ドレスデン 2 号機(BWR/3)のプラント鳥瞰図⁶⁾

を得ることができた。この経験は、その後の商業用原子力発電所の建設に大きく貢献している。JPDRは1963年10月26日初めて発電に成功し、それが「原子力の日」に決められている。

東芝グループとしてもJRR-3、自社の研究炉、JPDR等の建設に参画し、臨界達成に携わった原子炉は6基に上る。並行して、原子炉設計の基盤となる核設計、熱水力設計技術の研究開発をはじめ、原子炉制御機器・原子力計装・制御機器・燃料の研究開発、伝熱流動、訓練用原子炉を用いた運転自動化等の研究を進めるなど、動力用原子炉の国産化に向けて技術力の向上と経験の蓄積に努めた。しかし、1962年に立地が決定し、今にも始まると思われた商用炉の建設はなかなか現実のものとはならず、しばらく足踏み状態が続いた。

3. 商用軽水炉発電プラントの建設と技術提携

1963年米国GE社と、WH社が軽水炉のオファーを出し、自由世界では軽水炉の将来性に着目し、発注が相次いだ。我が国でも1965年1月から、日本原子力発電(株)がGE社、WH社に商用原子力発電プラントの正式見積を依頼し、技術検討を始めると共に契約条件などの詰めを開始した。

いよいよ商用炉が立ち上がるということで、東芝は過去からの長年の協力関係からGE社との間でBWR技術の導入について交渉を始めていたが、1966年6月、交渉が妥結し、1967年4月、システムライセンス契約が発効した。技術契約は最終的に、GE社—東芝、GE社—日立製作所でそれぞれ同一の契約形態で結ばれることになった。

敦賀1号機、福島第一1号機とGE社の下請けではあったが、原子炉系、タービン系を含めプラント全体を経験することができた。これと並行して、GE社とシステムライセンスを通じて米国技術を学び、原子炉のシステム、プラントエンジニアリング、原子力機器の国産化、プラント建設等の技術を消化していった。敦賀1号機、福島第一1号機における国産化率はおおの55%程度であったが、この経験を基に、機器の国産化のみならず、プラントの全面的な国産化を達成する基礎を築くことができた。

謝辞

執筆に当たっては、原子力事業に初期から携わってこられた益田恭尚氏、吉島重和氏に多大なご協力を頂きました。感謝申し上げます。

—参考文献—

- 1) ANS, *Controlled Nuclear Chain Reaction—The First 50 years*, (1992).
- 2) 原子炉研究班, “動力用原子炉(3)—沸騰水型炉”, 東芝レビュー, **11**[7], (1956).
- 3) 原子力事業開発部, “沸騰水型原子炉(BWR)”, 東芝レビュー, **12**[7], (1957).
- 4) L. Kornblith, Jr., *et al.*, Operating experience with the Vallecitos Boiling Water Reactor, *Electrical Engineering*, April (1959).
- 5) R. L. Haueter, *et al.*, “Operating Big Rock Point”, *Nucleonics*, Nov. (1964).
- 6) G. White, “Development in boiling-water reactors”, A/Conf. 28/P/205 USA session 1.2.
- 7) V. L. “Stone, Operating experience with boiling- water reactors”, A/Conf. P/204 USA session 1.2.
- 8) R. B. Richards, *et al.*, The 1965 Boiling Water Reactor, *Proc. American Power Conf.*, Vol.27, (1965).
- 9) M. J. McNelly, “The evolution of the boiling water reactor”, *Nucl. Eng.*, **222-224**, (1965).
- 10) M. Douglas, *et al.*, “Jet pump advance BWR recirculation flow-design”, *Nucleonics*, Dec. (1965).
- 11) M. J. McNelly, “Boiling water nuclear reactors”, *Chem. Eng. Prog.*, **61**[11], (1965).
- 12) D. H. Gregg, *et al.*, “Oyster Creek BWR sets 4-mill target”, *Electrical World*, June 14, 87-90, (1965).
- 13) 葦原悦朗, “最近の沸騰水型原子力発電所”, 東芝レビュー, **20**[6], (1965).
- 14) 稲葉栄治, 葦原悦朗, “最近のBWR発電所”, 東芝レビュー, **22**[7], (1967).
- 15) H. Fujii, A. Morishima, *Directory of Nuclear Power Plants in the World 1994*, Japan Nuclear Energy Information Center, (1994).

著者紹介

星出明彦(ほしで・あけひこ)

(株)東芝
(専門分野/関心分野)伝熱流動, 原子力
広報

前川 治(まえかわ・おさむ)

(株)東芝
(専門分野/関心分野)原子力発電プラ
ント, 機器設計