

北陸電力株式会社志賀原子力発電所2号機の完成

Construction of Shika Nuclear Power Station Unit No.2 of The Hokuriku Electric Power Co., Inc.

山成 省三 Shōzō Yamanari
宮原 良平 Ryōhei Miyahara

梅澤 健 Takeshi Umezawa
手柴 一郎 Ichirō Teshiba



北陸電力株式会社志賀原子力発電所2号機の全景

志賀原子力発電所2号機は、2006年3月に営業運転を開始する(写真中央が2号機で、手前がタービン建屋、後方が原子炉建屋。写真右は運転中の1号機)。

北陸電力株式会社の志賀原子力発電所2号機は、ABWRとしては初めて、原子炉とタービン発電機設備一式をプラントメーカー1社で取りまとめた、わが国最大級の発電所である。1999年8月に第1回工事計画が認可され、安全性、信頼性、経済性のいっそうの向上を目指して着工し、その後の建設、据付け、試験が順調に完

了し、予定どおり2006年3月に営業運転を開始する。

日立製作所は、原子炉とタービン発電機設備一式の設計・建設を取りまとめ、志賀原子力発電所2号機としての設計改良はもとより、プラント全般にわたって最新の設計技術と建設技術を駆使して機電と建築との融合を図り、安全で信頼性、経済性の高い発電所を提供した。

1 はじめに

北陸電力株式会社志賀原子力発電所2号機(ABWR(Advanced Boiling Water Reactor:改良型沸騰水型原子炉)、電気出力1,358 MW以下、志賀2号機と言う。)が完成し、2006年3月に営業運転を開始する。

この志賀2号機は、原子炉とタービン発電機設備のプ

ラント一式を日立製作所が担当(ABWRの1社取りまとめは世界初)し、設計・建設・試運転の各段階で日立製作所の最新技術を駆使した原子力発電所である。

ここでは、志賀2号機に採用した新技術と、1社取りまとめで最大限に生かすことができた最新建設工法などについて述べる。

2 新技術の採用

2.1 世界初の高経済性初装荷炉心

高経済性SUMIT(Spectral Unit Module Initial-Loaded Core:初装荷炉心)は、BWR(Boiling Water Reactor)の優れた運転実績をベースに、運転性と信頼性を維持しつつ、いっそうの経済性と燃料サイクル費の低減に寄与する初装荷炉心として開発された。

SUMITでは、先行炉ですでに実績のある平衡炉心模擬初装荷炉心をベースに、幾つかの概念を新たに採用している。そのうちのひとつであるスペクトルユニットモジュール装荷法は、これまで燃料集合体ごとに制御していた出力ピーキングを、燃料集合体4体で構成するユニットモジュールで最適化し、これを炉心内に周期的に配列することで径方向の出力ピーキングの平坦化を実現したものである。

2.2 中央制御室

2.2.1 居住性と操作性を考慮したデザイン

中央制御室での運転員の作業性・居住性の環境向上を図るため、部屋の色彩、盤・備品のレイアウト、照明環境などを考慮して、室内全体の意匠設計を実施した。

デザインコンセプトは「21世紀のエネルギーを支えるハイテク空間」とし、近未来的な円形を基調とした室内レイアウトとした。また、周辺機器・ディスプレイを壁に埋め込み、運転員と当直長の机から大型表示盤が見渡せるよう、視角を考慮して機器を配置した。

天井には階段状のステップを設け、間接照明を当てることで圧迫感の低減を図り、同時にディスプレイへの照明の映り込みを防止するなど、照明の配置に配慮した。

これらは、三次元のCG(Computer Graphics)により、デザインを決定した(図1 参照)。



図1 三次元CGを用いた中央制御室のデザイン
機器の配置計画を基に、壁・天井・床の色合い、照明の反射などをモデル化し、三次元のCG(Computer Graphics)を作成することでレビューを重ね、中央制御室のレイアウトを決定した。

2.2.2 HMI性の向上

志賀2号機のHMI(Human-Machine Interface)設計では、ABWR HMI標準化検討をベースにHMI性の向上を実現している。

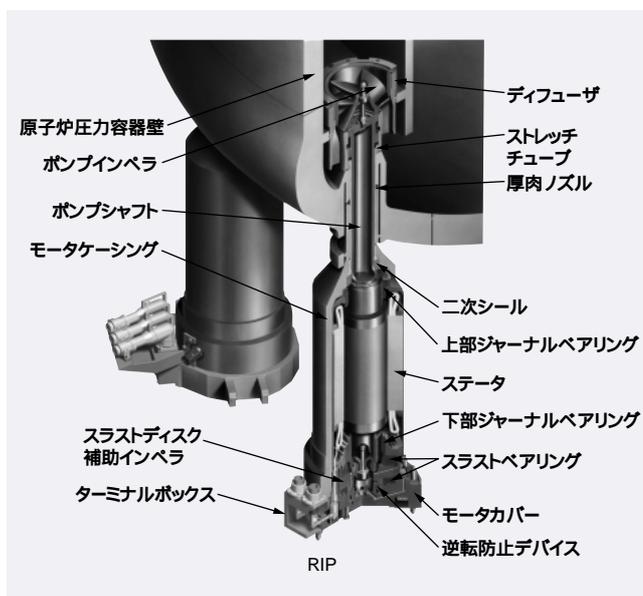
主盤・大型表示盤には、最新HMIデバイスである大型フラットディスプレイ(18.1型(46.0 cm))、従来は10.4型(26.4 cm)×2)を適用し、操作性と監視性を向上させている。適用に際しては、操作性と監視性を分析し、画面構成や機能分担を評価、確認し、画面集約化や盤形状の変更が操作性や運転に与える影響について、事象ごとに運転員の動線評価を実施し、運転性の向上を確認している。

大型表示盤では、液晶50型(127 cm) 4面マルチスクリーンによる大型スクリーンを採用し、高輝度で高視認性を実現するとともに、フラットディスプレイでの操作や警報内容を表示することにより、当直長を含めた運転クルー全体での情報の共有化を向上させている。

2.3 高耐震性インターナルポンプの開発・採用

RIP(Reactor Internal Pump:原子炉内蔵型再循環ポンプ)は、原子炉圧力容器の下鏡において、ノズルによって支持される構造となっている(図2 参照)。志賀2号機では、先行プラントより肉厚を約1.5倍増加させた厚肉ノズルの高耐震性RIPを採用した。

厚肉ノズルは、志賀2号機の設計・製作に先立って行われた電力会社各社との共同研究において開発され、ノズル部強度、ポンプ性能・機能への影響、炉内流動への影響と製造・検査性など、実規模試験により、さまざま



注:略語説明 RIP(Reactor Internal Pump)

図2 RIPの構造
RIPのノズルは、モーターケーシングの付け根となるので高い強度を持たせるとともに、上面はディフューザが固定されるので、ポンプからの流れを妨げないような構造としている。

な観点から検証が行われた。

志賀2号機への採用にあたっては、これらの成果を反映するとともに、志賀2号機と同一仕様のRIPと厚肉ノズルを組み合わせた試験を実施し、さらに検証を重ねた。これらの検証を経て、わが国のABWRで初めて設計、製作された志賀2号機の厚肉ノズル方式のRIPは、現在順調に運転を続けている。

2.4 IGBT-ASDの採用

志賀2号機ではRIPの駆動用電源として10台のASD (Adjustable Speed Drive:可変周波数電源装置) を備えている。このASDに適用するパワー半導体として、現在このクラスの電力変換器で主流として使用されているIGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) を適用した。これにより、ASDの小型化(床面積で先行機設計の約70%)を図るとともに、IGBTの特徴である高速スイッチング性を活かして、PWM (Pulse Width Modulation) 制御と、センサレスベクトル制御方式を採用し、瞬停再始動などの過渡事象発生時の制御性を向上できた。

2.5 WJP技術の駆使

SUS316L製炉内構造物の耐SCC (Stress Corrosion Cracking) 強化を目的として、耐SCC性の裕度付与のため、炉内構造物の溶接部に対し、工場と現地でWJP (Water-Jet Peening) を代表とする圧縮残留応力付与工法を実施した(図3参照)。

また、小型X線残留応力測定装置を用いて、工場と現地で、実機で施工部の圧縮残留応力を実測し、WJPの有効性を確認した。

2.6 わが国最大級ABWR用タービン発電機の採用

このプラントで採用されているABWR用タービン発電機は、現在単機容量としてわが国最大級(容量1,540

MVA)である。実績のある50 Hz、1,300 MVA機とはほぼ同じ体格であるものの、周波数が1.2倍の60 Hzに上がることで容量を約1.2倍に増加させ、冷却性能も向上させている。

さらに、この発電機では、発電機過渡リアクタンスを低減して長距離送電時の系統安定度を向上させている。その対策として、(1)日立製作所製単機最大容量機(容量1,570 MVA)より鉄心長を伸ばして電圧を増大させることで電気装荷を低減し、(2)漏れリアクタンスを低減するために、コイルスロットを扁平化させた。その結果、1,570 MVA機に比べて体格が大きくなっている。

2.7 高効率蒸気タービンの採用

志賀2号機向け蒸気タービンはABWR用に設計され、52インチ(132 cm)最終段動翼を採用した1,358 MW大容量機である。先行機である志賀1号機(540 MW)と比較した特徴は、以下のとおりである(表1参照)。

(1) 蒸気タービンの構造

志賀2号機は、出力1,358 MWと、志賀1号機より蒸気流量が2倍以上増加するため、低圧車室を2車室から3車室とし、最終段動翼は、38インチ(96.5 cm)に代えて52インチ(132 cm)長翼を採用した(図4参照)。

この52インチ長翼は、日立製作所が1985年に試作、開発し、60 Hz機として志賀2号機で採用した。50 Hz機向けには海外原子力用蒸気タービンに採用し、現在運転中である。

(2) 蒸気タービンの性能向上

この蒸気タービンでは、志賀1号機より性能向上を図るため、ノズルと動翼に新技術を採用している。

その中の代表的な技術として、AVN (Advanced Vortex Nozzle) がある。

AVNは、ノズルを翼長方向に湾曲させ、腹側を凸状に形成することによって、二次流れなどによる流れの不

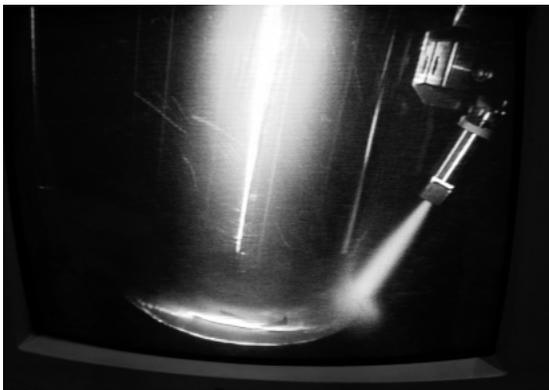


図3 制御棒駆動機構ハウジング溶接部のWJP (Water-Jet Peening) 施工状況
制御棒駆動機構ハウジングとスタブ溶接部のWJP施工予定箇所にあらかじめマーキング(赤色)を施し、炉内に水を張った後、WJP装置のノズルをゆっくり移動、回転させ、全周・全箇所にてWJP施工を実施した。

表1 基本諸元

志賀2号機と先行機である志賀1号機との基本諸元を比較して示す。

項目	志賀2号機	志賀1号機	
出力	MW	1,358	540
型式		TC6F-52	TC4F-38
主蒸気圧力	MPa	6.69	6.55
主蒸気温度		283.7	282.3
主蒸気流量	t/h	約7,300	約2,800
回転速度	min ⁻¹	1,800	1,800
段落数	高圧	7段×2流	6段×1流
	低圧	7段×6流	8段×4流
最終段動翼	インチ	52(132 cm)	38(96.5 cm)
車室数	高圧	1	1
	低圧	3	2
全長		約49 m	約32 m
抽気段数	高圧	2段	2段
	低圧	4段	4段

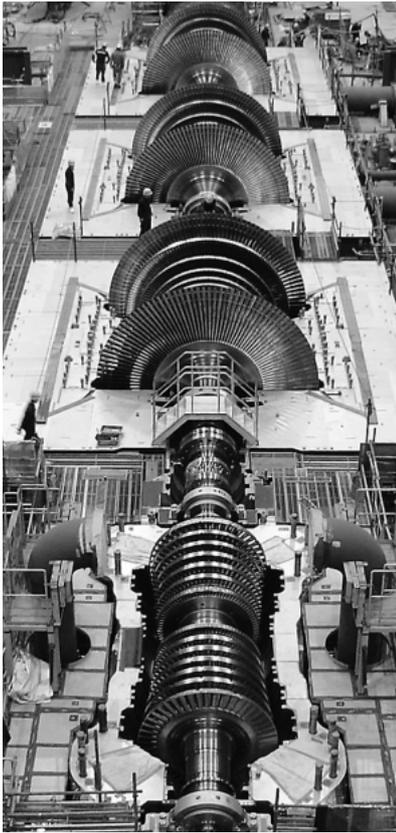


図4 蒸気タービンロータの全体の様子(据付け時)
蒸気タービンは4車室で構成され、写真下から高圧タービン、低圧A、B、Cタービンの順に並び、各低圧タービン両端に大きく見える翼は、52インチ最終段動翼である。



注:略語説明 AVN(Advanced Vortex Nozzle)

図5 ダイヤフラムの外観(a)と、従来ノズル(b)およびAVN(c)の外観
AVNはダイヤフラム(隔板)にセットされ、図4の蒸気タービン各動翼前部に組み込まれる。このAVNは、蒸気タービンの性能向上策の一つとして、大きく寄与している。

均一性を緩和することをねらいとしたものである(図5参照)。

この構造により、ノズルで発生する損失を低減し、蒸気タービンの内部効率を向上させた。この蒸気タービンでは、高圧・低圧の全ノズルにこのAVNを採用している。

2.8 三次元CADの全面適用

志賀2号機の配置・配管設計では、最新のコンピュータ技術を適用した三次元CAD(Computer-Aided Design)システムを用いた。先行プラントに比べて高機能化したこのシステムを全面適用することにより、いっそう高度な配置・配管設計が可能となった。

例えば、ポンプなどの点検時の通路スペースや機器や弁などの分解スペース、仮置きスペースなどのメンテナンス性を十分に考慮、確認することが容易になった(図6

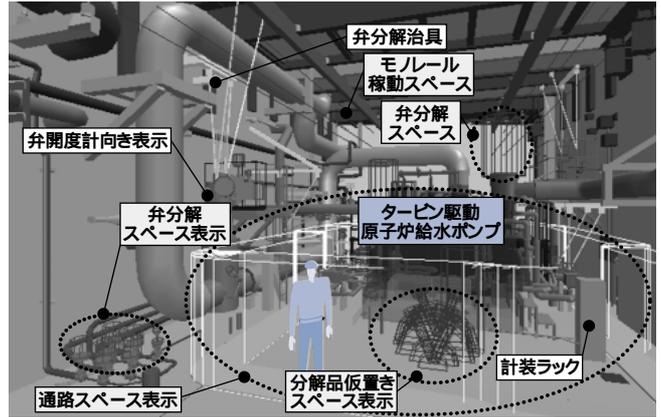


図6 エリア全体配置図の例
三次元CADを用いて機器の分解スペースや通路スペースを表示した一例を示す。これにより設計段階でより合理的なレイアウトを計画することが可能となった。

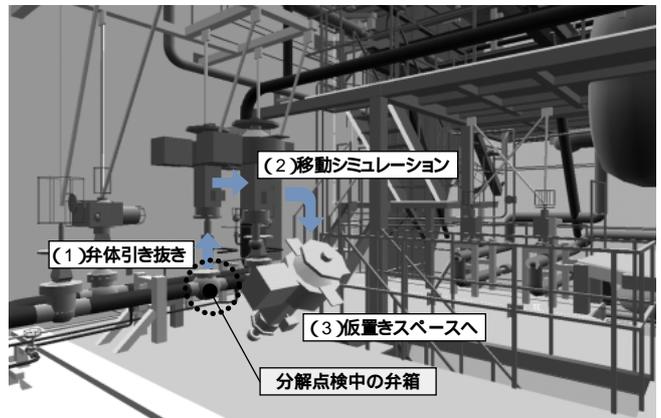


図7 機器分解のシミュレーション例
三次元CADを用いることで、機器の分解、移動といった一連の作業内容をビジュアルに見ることができ、作業中の干渉物を確認することが可能となった。

参照)。

さらに、機器の分解点検時のシミュレーションを実施できるようにした結果、効率のよい作業計画に加え、作業に対する干渉物をあらかじめ確認することができるようになった(図7参照)。

このように、三次元CADシステムを用いることで、プラントレイアウト設計の効率化、精度向上を達成できたことに加え、グラフィクス機能を十分に活用した種々のシミュレーション機能により、プラントの供用期間中における設備の使い勝手やアクセス性、メンテナンス性や分解した機器の搬出入性確認、大物搬入時の手順検討が容易にできるようになった。その結果、建設計画の段階で、将来を見込んだプラントを計画することが可能になった。

3 最新建設工法

3.1 建設工程

志賀2号機では、1999年8月に第1回工事認可を取得して、着工し、2006年3月の営業運転開始を目指して、現在起動試験を集約中である。本館基礎掘削開始(1999年9月)から運転開始まで78か月、岩盤検査

(2001年6月)から運転開始まで57か月という工程で予定どおり建設を完了した。

3.2 建設戦略と手段

志賀2号機の建設では、(1)機電と建築の複合一体化も含めた大ブロックモジュール工法の適用拡大、(2)機器・配管類の先入れ拡大と、建築と機電工事の併進化、(3)階層別工法の適用、(4)情報技術の活用による建設管理の四つの手段による、作業平準化(ピーク低減)と作業効率化の推進を建設戦略とした。これにより、安全性と品質向上を図りながら建設工期の確保を達成した。

3.2.1 大ブロックモジュール工法の適用拡大

モジュール工法は、機器や配管、バルブ、操作架台などを、事前に工場または現地ヤードで組み立て、大型クレーンを用いて搬入、据え付ける工法である。

日立製作所は、1980年代初頭から、世界に先駆けて原子力プラント建設にこの工法を採用し、独自にその技術を発展させてきた。この設計には、重心計算機能や自動つり点算出機能などのモジュール専用機能を搭載したCAE(Computer-Aided Engineering)システムを用い、設計から製作、現地搬入にわたる一貫したエンジニアリングや、2000年に竣工(しゅん)工したモジュール組立専用工場を活用することにより、志賀2号機建設では約200基ものモジュールの適用が可能となった。原子炉遮蔽壁や各種構造物、配管など、全650tを一体化したRCCV(Reinforced Concrete Containment Vessel)モジュール(図8参照)はもとより、受電工程確保を目的に建築・機電が融合し、志賀2号機で初めて採用した中操室天井モジュールなど、大型モジュールの採用拡大を図った。さらに、主蒸気トンネル室モジュール(55t×2基)では、三次元計測技術を活用することで、モジュール搬入後の配管開先調整の最小化、現地設定の簡易化など、モジュール技術の高度化を達成した。

3.2.2 機器・配管類の先入れ拡大と、建築と機電工事の併進化

志賀2号機では、建築側との綿密な調整により、先入れ品の範囲・物量を拡大するとともに、従来はエリア引き渡し後であった機器・盤・ラックの設定、各製品のベース設定、操作架台設定、仮設照明・電源設備の設置、デッキプレートの切欠、モノレール設定、弁つり設定などを、エリア引き渡し前に併進して実施することが可能となった。これにより、作業の平準化を図るとともに、現地作業の効率向上を達成した。

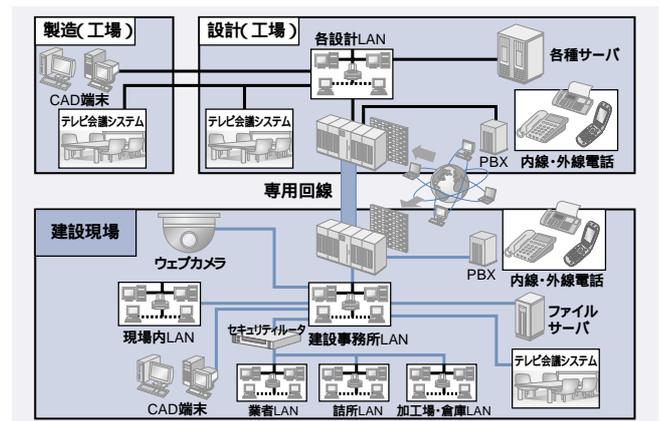
3.2.3 階層別工法の適用

建設初期に地下階でクローズされている系統や、分割耐圧試験の実施が比較的容易な系統を抽出して分割耐圧試験を実施した。その結果、地下階から順にエリ



図8 RCCVモジュールの据付け状況

RCCV(Reinforced Concrete Containment Vessel)内の上部ドライウェルを対象とした、大型クレーンによるモジュール(質量650t)の据付け状況を示す。



注:略語説明 CAD(Computer-Aided Design)、LAN(Local Area Network)
PBX(Private Branch Exchange)

図9 ネットワーク設備の構成

事業所、現地事務所、現地間のネットワーク構成を示す。

アクローズでき、作業量の平準化による効率的な作業消化と作業ピークの抑制が可能となった。

3.2.4 情報技術活用による建設管理

(1) 現地ネットワークの構築

設計と製造を行う各事業所(工場)と建設事務所とをネットワークで結ぶことにより、各種設計情報のタイムリーな確認など、事業所と同様に業務を行える環境を構築した。さらに、建設事務所と現場もネットワークで結ぶことにより、事務所との相互通信が可能な環境(現場サテライト)を構築した。現場内でも各種図面や工程などの電子データの閲覧が可能となり、事務所業務と現場作業の効率が向上した(図9参照)。

(2) 総合建設システムの開発・導入

原子力プラント建設の据付け工事では、取り扱う製品

数が膨大であり、工事着手前の綿密な計画、計画に合わせた製品や図書のJIT(Just in Time)、計画と実績の偏差の早期把握、早期是正措置が必要不可欠である。そのため、工場と現地サイトで情報を共有し、各現地作業をワークフロー化することにより、適切かつタイムリーな現地管理を実現する、総合建設システムを開発し、導入した。さらに、管理の効率化と漏れのない管理を行うためにシステムを拡充し、据付け工事だけでなく、試運転への製品引き渡しや残作業管理を支援する系統移管システムを導入し、据付け工事から系統移管作業まで、建設過程で一貫した現場管理を実現した。

4 試運転

4.1 系統試験

2004年4月の275 kV系の初受電後、各系統の機器、配管、弁、および計装品などの据付け工事完了に伴い、系統試験を開始した。ポンプなどの各種機器、弁、および計器類などの性能を単体試験で確認後、設計仕様として要求された各系統の機能と性能を系統試験で確認した。代表的な系統試験としては、2004年9月のECCS (Emergency Core Cooling System:非常用炉心冷却系)の注水試験(図10参照)、11月の原子炉压力容器と付属配管耐圧漏えい試験、ならびに500kV系受電、翌2005年2月の原子炉格納容器漏えい率試験、3月の制御棒駆動系試験などがあげられる。

同年3月末には燃料装荷前の最終試験として総合機能試験を終了し、4月から燃料装荷作業に着手した。

4.2 起動試験

起動試験は、燃料装荷に始まる大気圧試験、核加熱試験、各出力段階(20%、50%、75%、100%)試験、性能保証試験の順に出力を上げながら実施した。段階に分けての試験は、(1)原子炉とプラントの部分出力から定格出力全域にわたる安全性、安定性を確認するとともに、(2)部分出力での試験結果から、次の段階への出力増加に対してプラントの安全性と安定性が確保されているかどうかを確認することで、起動試験自体を安全に実施することを目的としている。

5 おわりに

ここでは、北陸電力株式会社志賀原子力発電所2号機で日立製作所が取りまとめた原子炉とタービン発電機設備の設計、および建設技術について述べた。

志賀2号機では、設計・建設の各分野で、原子炉とタービン発電機設備一式を取りまとめることにより、適用

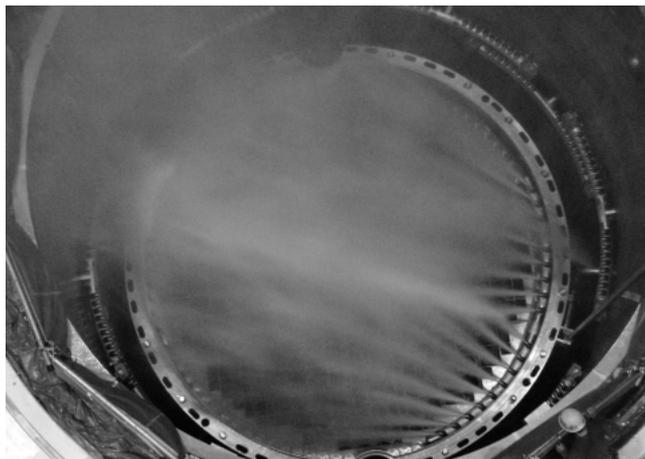


図10 高圧炉心注水系の注水試験状況

ECCSは、原子炉压力容器につながる配管が万一破損した場合でも、燃料を冷却できるように設けている。写真は、高圧炉心注水ポンプにより、原子炉へ注水している様子を示す。

範囲の拡大や機電と建築の融合など、今までの経験と最新の技術が効果的に発揮でき、時代要求に即した信頼性・経済性の高い発電所を完成させることができた。

日立製作所は、今後も、原子力発電プラントメーカーとして、安心・安全で経済性を兼ね備えたプラントを提供できるように、技術開発を進めていく考えである。

参考文献

- 1) 高橋, 外: ABWR慣性増加型インターナルポンプおよび厚肉スリーブの開発, 日本原子力学会和文論文誌, Vol.1, No.3(2002)
- 2) 三浦, 外: 原子力プラント統合現地建設システムの開発, 日立評論, 87, 2, 199~202(2005.2)

執筆者紹介



山成 省三

1970年日立製作所入社、電力グループ 日立事業所 原子力プロジェクト統括部 所属
現在、志賀2号機のプロジェク業務に従事
日本原子力学会会員
E-mail:shozo.yamanari.du@hitachi.com



宮原 良平

1983年日立製作所入社、電力グループ 日立事業所 原子力プラント部 所属
現在、建設プラントの建設計画に従事
E-mail:ryohei.miyahara.hz@hitachi.com



梅澤 健

1991年日立製作所入社、電力グループ 日立事業所 タービン設計部 所属
現在、蒸気タービンの計画・設計に従事
日本機械学会会員
E-mail:takeshi.umezawa.my@hitachi.com



手柴 一郎

1992年日立製作所入社、電力グループ 日立事業所 品質保証本部 原子力品質保証部 所属
現在、志賀2号機の起動試験に従事
日本原子力学会会員
E-mail:ichiro.teshiba.nu@hitachi.com