

原子力発電プラントの信頼性向上技術

Constant Improvements in Structural Reliability of Nuclear Power Generation System Components

渡部 幸夫

■ WATANABE Yukio

浅野 政之

■ ASANO Masayuki

今日、原子力発電はベースエネルギー源として重要な役割を果たしている。また、地球温暖化を促進する二酸化炭素 (CO₂) ガスの排出もほとんどないクリーンなエネルギーであり、将来に予想される化石燃料の枯渇を補う安定した電力源としての期待も大きい。このような原子力発電が、今後とも安定なエネルギー源として期待に応えていくためには、発電プラントの信頼性を更に向上させていくことが不可欠になっている。

東芝はこのようなニーズに応えるため、測定と統合解析技術を駆使して機器の使用条件を高精度で把握し、機器、材料、製造、炉水管理技術の開発・改良に反映させている。

In recent years, demand has been increasing for nuclear power generation systems with higher structural reliability to play an important role as a basic resource for a clean and steady energy supply, against the background of the need to reduce fossil fuel consumption and protect the global environment.

To meet these requirements, Toshiba has been making constant efforts to improve equipment, material, manufacturing, and water chemistry technologies, in order to develop reliable nuclear power generation systems based on the optimal understanding of operating conditions measured and estimated by a systematic analytical approach.

1 まえがき

今日、原子力発電はわが国のベースエネルギー源として重要な役割を果たしている。また、地球温暖化の一因と考えられている CO₂ ガスの排出もほとんどなく、地球環境の面からも優れた発電システムである。更に、石油をはじめとする化石燃料が枯渇することが懸念される将来において、原子力エネルギーには再生可能で安定な電力源としての期待も大きい。このような期待に原子力発電が応えていくためには、プラントの信頼性の確保や向上が不可欠であり、これらは同時に、プラント効率の向上や環境負荷の低減にもつながる。

ここでは、ハード面の取組みに重点を置き、まず、プラント運転時の複雑な現象を正確に解明して設計や製造に反映させる解析技術と、見えない炉内機器の振動や軸受の摩耗状態を外部から測定した振動で監視する技術について述べ、次に、機器の耐損傷性能を向上させる材料や製造技術、及び機器に与える負荷やダメージの小さい水質に改善する技術への取組みについて述べる。

2 解析による信頼性確保

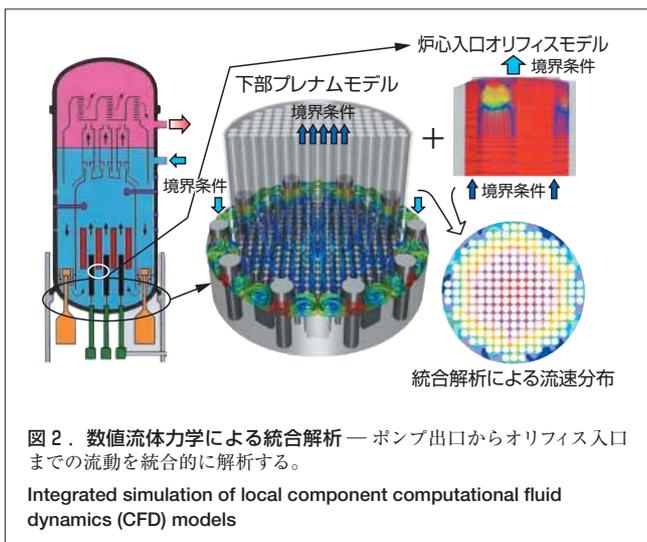
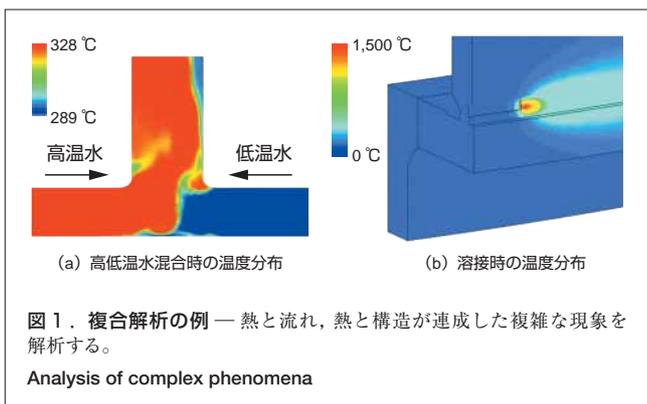
数値流体力学を用いた大規模で高精度な解析技術の実用化により、従来は詳細までわからなかった複雑な現象が解明できるようになった。例えば図1 (a) は、高温水と低温水が

合流する部分の温度分布の解析結果である。高温水と低温水の流量比や、配管口径比による合流部の温度分布とその変動の影響を詳細に評価している⁽¹⁾。この詳細な温度分布と変動を用いて応力変動を解析することにより、疲労評価の信頼性を向上させている。

また、図1 (b) は溶接時の温度分布を示すが、何層にも溶接するときの温度履歴による材料の膨張・収縮で構造物に生ずる変形や残留応力の評価も、解析で行えるようになっていく。変形は製作寸法精度に、残留応力は疲労や応力腐食割れに影響を及ぼすため、入熱条件や溶接層厚さの影響を詳細に評価して、変形や残留応力が小さい溶接条件を探索し、製造に反映させている。

原子炉内の流動解析については、従来は個別の解析モデルであったものを、出力を次の解析モデルの入力として統合することにより、それぞれの影響を詳細に評価できるようになった。例えば、下部プレナムの流動解析と炉心入口オリフィスの流動解析を統合させた例を図2に示す。

図2は流速分布を示しており、オリフィス中央の赤い部分が高流速を表している。従来はそれぞれに境界条件を設定していたが、上流側のモデルにだけ境界条件を設定し、その出力を下流側モデルの境界条件として使用する。このため、境界条件の設定に伴う不確定要因を減少させて、解析の信頼性を向上させている。更に、統合した解析で炉心全体の性能評価を進めて増出力支援などを行うよう、炉心の詳細



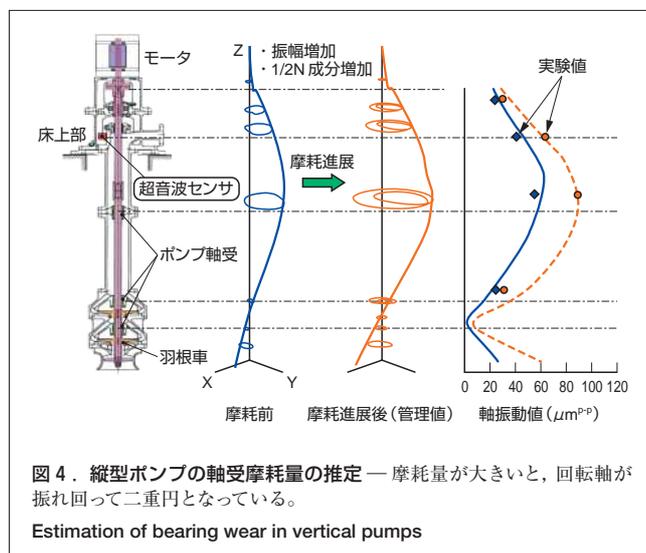
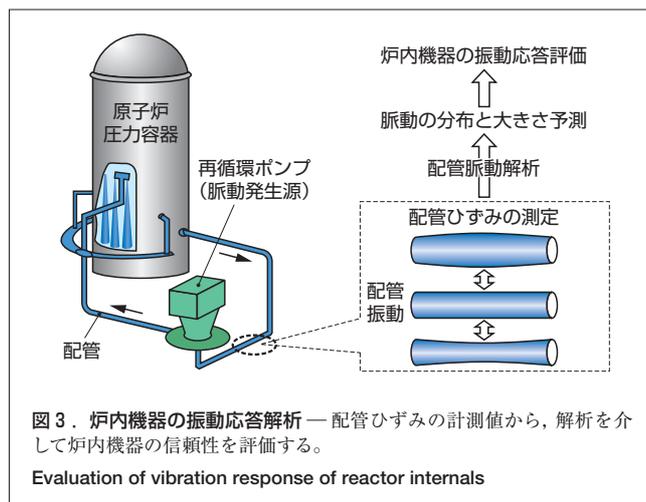
二相流解析と気水分離器の流動解析の統合化を進めている。

3 機器の信頼性

炉内機器の信頼性確保のためには、振動による疲労を監視する必要がある。しかし、炉内の圧力変動や振動の直接測定が困難なため、図3に示すように、外にある配管の圧力変動を測定して炉内の圧力変動を解析により推定し、炉内機器の振動応答を評価して信頼性を確保している。炉内機器の振動は、炉水を循環させる再循環ポンプの羽根が回転して出口を通過するときに発生する水圧脈動が、配管から炉内に伝搬して誘起される。このため、配管の脈動によるひずみを監視することにより、運転範囲のすべてにわたり炉内の圧力変動を求め、各機器の振動評価を行ってその信頼性を確保している。

多種多様な機器については、個別に運転情報、振動などの状態監視情報、及び定期検査の点検情報を登録した機器カルテを作成し、運転情報や点検情報と状態監視情報を統合して管理・評価を行うシステムにより信頼性を確保している。

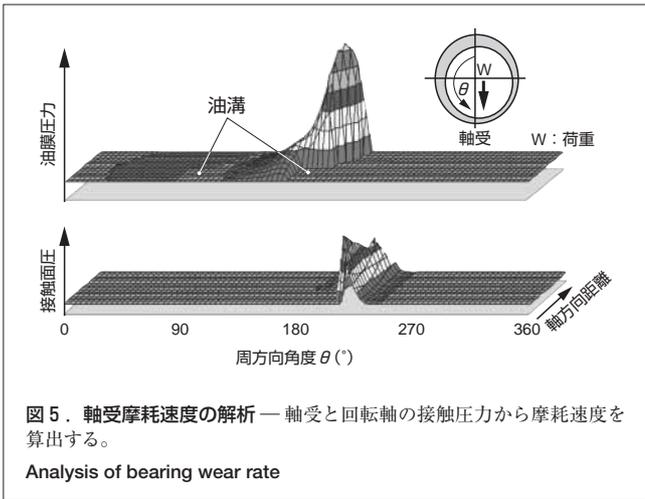
また、図4に示すように、縦型ポンプのケーシングの外側から超音波振動計で回転軸の振動を計測することにより、機



器を分解しないで軸受摩耗量を推定する手法を開発している。この超音波式振動計は、ポンプケーシング外側から超音波センサによりパルス状の信号を回転軸に向かって発信し、その反射波の遅れ時間の変動に水中音速を乗じて回転軸の振動波形を求める振動計である⁽²⁾。これを用いれば、ケーシングに穴を開けなくても、超音波センサを手で当てて内部の振動を計れるので非常に便利である。

また、この振動計を用いて床上での軸振動を計測し、ポンプの振動応答解析を利用することにより、床下にある軸受の摩耗量を推定できる。軸受摩耗が大きくなって軸が振れ回る状態を解析した結果、軸が二重円を描いて振れ回るようすを正確に再現しており、振動値も測定結果とよく一致していることがわかる。この方法により、ポンプ軸受の摩耗状態が監視でき、機器の健全性を監視・診断できる⁽³⁾。

更に、軸受の摩耗がどのような速度で進展するかを解析することは、機器の寿命を予測するうえで重要である。図5は、滑り軸受が荷重を受けて回転している場合について、油膜



圧力及び、軸受と回転軸の接触圧力を解析した例である⁽⁴⁾。油膜圧力と接触圧力から、摩耗速度を予測できる。軸受の摩耗速度に対する表面粗さや荷重の振動周波数の影響を定量的に評価できるので、軸受の交換時期の予測も可能となり、軸受の信頼性向上に反映させている。

4 材料の信頼性

高温の炉水と接する原子力機器材料は、炉心近くでは燃料の核分裂による中性子の照射を受ける。このため、材料の信頼性を確保するためには、強度、耐食性、耐照射性などの材質変化を長期にわたり正確に把握し、その寿命を的確に予測することが重要である。図6に示すように、材料には稼働時間に伴って疲労や応力腐食割れなどの損傷が蓄積され、表面に傷を生じ(発生寿命 t_i)、進展して荷重に耐えられなくなり破壊する(進展寿命 t_p)。発生と進展の状況を表す進展曲線と、負荷能力の限度を表す限界曲線は、応力や材質変化の影響を受ける。

したがって、想定される広範な使用条件に対し、機器材料の疲労や応力腐食割れの特性と、それに及ぼす熱時効や中性子照射の影響を評価して寿命予測法を開発するとともに、

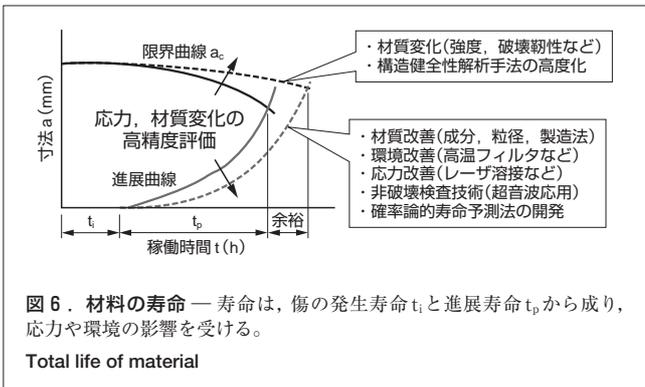
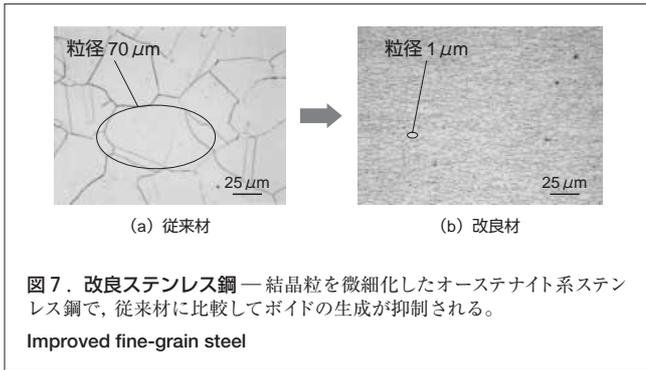


図6. 材料の寿命—寿命は、傷の発生寿命 t_i と進展寿命 t_p から成り、応力や環境の影響を受ける。
Total life of material

材料、環境、応力条件の改良を進めている。更に、原子炉内に設置した試験片を定期的に取り出して、中性子照射による材質変化を直接調べ、寿命予測法の精度を向上しながら、安心して使用できる応力や期間を確認してプラント運用に反映させている。

炉心近くの金属材料は、核分裂で生じた中性子の照射を受けると規則的に並んでいた原子がはじき出されて原子空孔を生成し、これが時間の経過とともに結晶粒内に集合してポイドとなり、その成長により材料がひずんで脆化(ぜいか)する。一般に、空孔は結晶粒界で消滅する特性を持つため、結晶粒を微細化して粒界を増やすことにより、空孔発生箇所から粒界までの距離が近くなって空孔が消滅しやすくなり、耐照射性を改善できる。

炉心で使用される材料の信頼性を向上させるため、オーステナイト系ステンレス鋼の化学成分、冷間加工率、熱処理条件を最適化して、結晶粒径を $70\mu\text{m}$ から $1\mu\text{m}$ まで微細化した例を図7に示す。また、結晶粒径が $70\mu\text{m}$ の材料ではポイドが発生する条件でも、 $1\mu\text{m}$ に微細化した材料ではポイドの発生がないことを確認している⁽⁵⁾。



5 炉水の信頼性

炉水は、燃料棒表面などで生じた微細な固形の腐食生成物(クラッド)や金属イオン、イオン不純物などを含んでいる。機器が損傷を受けたり放射能により汚染されるのを防止するため、原子炉の冷却材浄化系やタービンから原子炉に戻る復水浄化系で、これらクラッドや金属イオン、イオン不純物を除去している。現行の原子炉冷却材浄化系は、高温で分解するイオン交換樹脂を用いるため、炉水の温度を 60°C 以下まで下げている。

これに対し、熱交換器を介さない処理で保全対象となる耐圧部構成機器を削減して信頼性を向上させ、樹脂と捕獲物の溶出による炉水水質への影響を低減するため、従来より浄化性能を高め、かつ直接高温で処理できるシステムの開発を進めている。このシステムは、高温でクラッドを除去する金属製フィルタ(図8)とイオン不純物を除去する電気脱塩

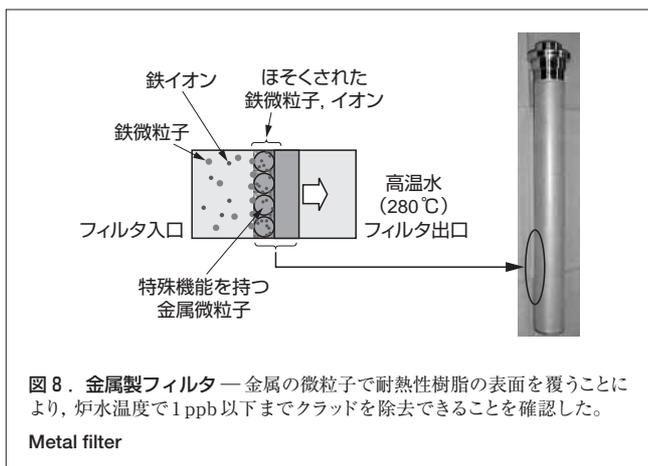


図8. 金属製フィルタ — 金属の微粒子で耐熱性樹脂の表面を覆うことにより、炉水温度で1ppb以下までクラッドを除去できることを確認した。

Metal filter

装置から構成され、この金属製フィルタは実験室レベルの試験において、高温浄化水の出口水質で1ppb以下までのクラッド除去性能を達成している。

6 製造技術の信頼性

原子力機器の製造においては、正確で早いことに加え、材料に与えるダメージをできるだけ抑えることが重要である。溶接では、入熱を低くして熱影響部を狭くし変形を抑えることで、残留応力を低減することができる。このため、図9に示すように、寸法精度が要求される制御棒にレーザー溶接法の適用を進めている。制御棒は、原子炉の压力容器内で燃料の核反応を制御する。内側に中性子吸収材を組み込んだブレードと呼ばれる板厚1mm程度のステンレス鋼板が、制御棒の中央で溶接接合され、ブレードとコマも溶接されている。

このように薄いステンレス鋼板の溶接では変形が大きいいため、従来の溶接方法より入熱の小さいレーザー溶接を開発した⁽⁶⁾。図9(c)にレーザー溶接のビードの外観を示すが、通常

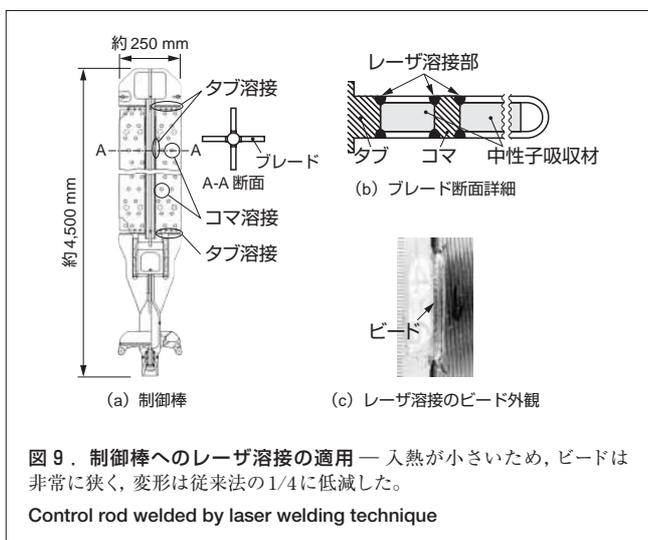


図9. 制御棒へのレーザー溶接の適用 — 入熱が小さいため、ビードは非常に狭く、変形は従来法の1/4に低減した。

Control rod welded by laser welding technique

用いられるTIG溶接(不活性ガスでシールドしたタングステン電極のアーカ溶接)に比較してビード幅は非常に狭く、入熱が小さいので、制御棒の変形を従来溶接法の約1/4と大幅に低減でき、溶接による熱影響や残留応力の発生範囲も狭く、材料へのダメージも小さい。

7 あとがき

昨今の原油高値安定は化石燃料生産のピークと言われ、将来のエネルギー確保がますます重要になってきている。原子力発電は再生可能なエネルギーで、将来にわたり安定した電力供給源としての期待が大きい。原子力発電がこのような期待に応えていくためには、発電プラントの信頼性を更に向上させていくことが必要である。

信頼性を向上するためには、炉内の現象を正確に把握し、機器用材料の能力を向上して負荷を軽減することが重要である。ここでは、そのために当社が開発を進めている技術として、プラント運転時の複雑な現象を解析する技術、見えない炉内機器の振動や軸受の摩耗状態を外部から測定した振動で監視する技術、機器の耐損傷性能を向上させる材料や製造技術、及び機器に与える負荷やダメージの小さい水質に管理する技術について述べた。このような取組みは、機器の効率向上や地球環境への負荷低減にも通じていることから、原子力発電プラントの更なる信頼性向上を目指していきたい。

文献

- 池田 浩, ほか. “LESによるT字配管合流部の温度揺らぎ現象評価”. 日本原子力学会秋の大会予稿集. 2004, p.342.
- Kanemoto, S. “Development of ultrasonic vibrometer for vertical pump bearing wear diagnostic system”. International symposium on machine condition monitoring and diagnosis. JSME. 2002. p.93-97.
- 尾崎健司, ほか. “海水ポンプの監視診断装置の開発”. Dynamics & Design Conference 2004. 337.
- 渡部幸夫, ほか. “回転機の劣化予測技術の開発(1)(軸受摩耗解析)”. Dynamics & Design Conference 2000. 441.
- (財)エネルギー総合工学研究所. 革新的実用原子力技術開発提案公募事業 “超臨界圧水冷却炉の実用化に関する技術開発” 成果報告書. 2004.3.
- 北側彰一, ほか. 造船・重工業分野へのニュー溶接・接合プロセスの適用. 溶接学会誌. 72, 1, 2003, p.44-48.



渡部 幸夫 WATANABE Yukio, D.Eng.

電力・社会システム社 電力・社会システム技術開発センター 機器・システム開発部主幹, 工博。原子力機器の振動診断技術の開発に従事。日本原子力学会, 日本機械学会, 日本保全学会会員。

Power and Industrial Systems Research and Development Center



浅野 政之 ASANO Masayuki, D.Eng.

電力・社会システム社 電力・社会システム技術開発センター 金属・セラミックス材料開発部主幹, 工博。原子力機器の強度最適化技術の開発に従事。日本機械学会, 日本材料強度学会会員。

Power and Industrial Systems Research and Development Center