

岩重健五 Kengo Iwashige 濱武 久司 Hisashi Hamatake 青山肇男 Motoo Aoyama 山本研二 Kenii Yamamoto 浦井一 Hajime Urai



注:略語説明 ABWR (Advanced Boiling Water Reactor), UHV (Ultra High Voltage) 図1 地球温暖化抑制に貢献する電力製品の研究開発

CO:排出量の削減,環境負荷の低減を実現するために,火力発電や原子力発電プラント,それらを支える変電設備など,電力分野の製品では,さらなる発電効率の 向上と信頼性の確保をめざし、実証試験と合わせてシミュレーション技術を活用した研究開発に取り組んでいる。

地球温暖化の抑制に貢献するため,電力分野の主力製 品である火力発電や原子力発電プラントにおいてはCO2排出 量の削減や環境負荷低減,経済性の向上が重要な課題と なっている。

日立グループは、これらの要求に応えるために蒸気タービ ンや石炭燃焼ボイラ、原子力機器のさらなる発電効率と出力 の向上,送変電設備の信頼性の確保をめざしている。これら の機器の研究開発では、実際のプラントの運転条件や非定 常現象を模擬するために、実証試験とともにシミュレーション 技術を積極的に取り入れて実用化に取り組んでいる。

### 1. はじめに

地球温暖化の抑制に貢献するため、CO2排出量の削減, 環境負荷の低減が電力分野の製品に課せられた目標であ り、重要な課題となっている。火力発電や原子力発電プラン ト, それらを支える送変電設備においても, これらの観点から 発電効率と信頼性の向上が要求されている。

日立グループは、運転状態におけるプラントや機器の性能 と健全性、非定常現象をシミュレーションにより予測し、設計 に反映する「Design by Analysis(解析主導型設計)」の確立を めざして,実証試験と合わせてシミュレーション技術を活用し た研究開発に取り組んでいる。

ここでは、電力分野の主要製品である蒸気タービン、石炭 燃焼ボイラ, 原子力システム, ガス遮断器の研究開発におい て,実証試験に先立ち活用されているシミュレーション技術に ついて述べる(図1参照)。

# 2. 蒸気タービンのシミュレーション

### 2.1 高効率化と信頼性向上

新設の石炭火力発電プラントや原子力発電プラントへの高 効率蒸気タービンの採用とともに,老朽化した蒸気タービンの 高出力・高効率化も、省エネルギー,CO2排出量削減に寄与 する役割は大きい。

蒸気タービンに適用されるシミュレーション技術は,熱収支 などプラント特性の解析,蒸気タービン全体効率の評価,空 力設計の中心となる流体解析,構造設計の中心となる応力 解析,振動応力とモーダル解析,軸系振動応答解析に大き く分けられる。開発段階ではこれらを駆使して新しい技術を 開発し,要素試験やモデルタービン試験により検証する。設 計プロセスの各段階でも,高効率で信頼性の高い蒸気タービ ンをつくり上げるためにシミュレーション技術を活用している。 以下では,空力設計において性能評価に適用する流れ解析 を中心に述べる。

### 2.2 高中圧タービン

高中圧タービンの内部効率の向上には、小径多段化が効 果的である。小径多段タービンに採用する最適反動翼として、 三次元乱流解析を活用し、従来翼より高性能な最適反動翼 「HX翼」を開発している(図2参照)。開発には実験計画法を 採用して、入射角変化に対する損失特性が緩慢なロバスト 設計を達成している。単段空気タービン試験により、HX翼単 体で3%の効率向上が見込めることを検証しており、実機でも その性能を確認している<sup>1)</sup>。

## 2.3 低圧タービン

蒸気タービンの低圧段では、最終段に向かって環帯面積 が急増し、流れの三次元性が大きくなる。そのため、段落設 計に際しては、静動翼の三次元フローパターンの最適化が重 要である。翼形状設計が完了していない初期の段階では、 準三次元解析を用いてスチームパスやフローパターンを検討 するが、最近では非平衡相変化も考慮できるようになっている。 特に低圧最終段では、動翼根元部での流れの剥(はく)離や 衝撃波の生成を抑えるフローパターンを実現するため、静翼 に三次元スタッキング(AVN:Advanced Vortex Nozzle)を採用 しているが、その効果を評価するための三次元段落解析により 蒸気流量、段落負荷、損失を精度よく予測している(図3参照)。

#### 2.4 出入口流路

段落性能だけでなく、出入口部の圧力損失低減もタービン 効率向上効果が大きい。高圧タービン入口では蒸気弁から 初段入口までが対象となり、大規模なシミュレーションによって 高効率化を図っている。中圧タービンでは、曲がりや分岐流



#### 図2 従来翼と「HX翼」との解析比較例

単段空気タービンの三次元乱流解析による無次元化した全圧分布を示す。 HX翼では翼枚数の低減と二次流れの抑制の効果で低全圧領域が減少し、性能向上していることがわかる。



#### 図3 低圧タービンの流れ解析例

三次元段落解析を用いて圧力,流入角,損失分布などを詳細に分析している例を(a)に示す。また,蒸気の非平衡相変化を考慮し低圧タービンのフローパ ターンを最適化している例を(b)に示す。なお、等値線は湿り度分布を示す。



#### 図4 蒸気タービン排気流路流れ解析例

高圧タービン入口部(a), クロスオーバー管を含む中圧タービン排気部(b), 最終段と排気室一体の低圧タービン排気部(c), それぞれの流れ解析では圧力 損失発生領域を特定し, 流路形状を最適化している。

路での滑らかな流れの実現を目的として,中圧タービン出口 部からクロスオーバー管と低圧タービン入口までを一体で解析 している。

さらに,最終段と排気室の一体モデルの流れ解析を用い た検討では,排気部での圧力回復の最大化と復水器真空変 化に対するタービン効率におけるロバスト性の向上を図ってい る(図4参照)。

# 3. 石炭燃焼ボイラのシミュレーション

# 3.1 バーチャルボイラシステム開発の背景

石炭燃焼ボイラでは、効率と信頼性、排出ガスのクリーン 化などの性能向上が要求されている。特にCO2排出量削減 への要求の高まりから、ボイラの蒸気温度・圧力の上昇による 効率向上や排出ガスクリーン化に適した燃焼方法の開発が 求められている。これらの要求を満たしたボイラを経済的に実 現するためには、ボイラ全体の物理現象を精密に予測する数 値シミュレーション技術が必要である。このために、ボイラの全 系解析システムとして「バーチャルボイラシステム」を開発した。

バーチャルボイラシステムの特徴は、(1)専門家でなくても 容易に入力条件を作成できるGUI(Graphical User Interface), (2)三次元的に配置した伝熱管の温度を計算可能な後部伝 熱面解析、(3)計算精度の高いLES(Large Eddy Simulation) 乱流モデルを用いた乱流燃焼解析の3点である。バーチャル ボイラシステムの概要と、後部伝熱面解析技術、乱流燃焼解 析技術について以下に述べる。

#### 3.2 バーチャルボイラシステムの概要

バーチャルボイラシステムの構成を図5に示す。このシステ ムの対象とする機器は火炉と後部伝熱面である。各機器を連 成して計算することで、ボイラの総合性能を予測することはで きるが、機器ごとに詳細な計算メッシュを作成することは、専 門家であっても非常に時間が掛かる作業であった。そこで、 ウェブブラウザ上からGUIを用いて、入力したデータを基に自 動的に計算メッシュを作成するツールを組み込んだ。これによ り、メッシュ作成時間が約 10 になり、このシステムが性能評 価に使われるようになった。

## 3.3 後部伝熱面解析技術

蒸気を高温化して効率を向上するためには, 伝熱管群の



注:略語説明 GUI(Graphical User Interface) 図5 バーチャルボイラシステムの構成 GUIを使用し、容易にボイラ全系の計算ができるようになった。



図6 三次元後部伝熱面解析ツールの計算結果 火炉と後部伝熱面の計算を連成し、各伝熱管の蒸気温度を計算可能にした。

温度を三次元的に精密に予測し,管仕様を適切に選定する ことが,信頼性,経済性の両面から重要となる。しかし,伝 熱管温度の三次元性を考慮した解析例はほとんど見当たら ない。これは,管群を含む高温流れ場の輻(ふく)射伝熱を計 算できなかったためである。そこで,三次元的な伝熱管配置 の模擬が可能な高速輻射計算アルゴリズムを開発した<sup>2)</sup>。こ のアルゴリズムを組み込んだ三次元後部伝熱面解析ツールを 開発し,伝熱管1本1本の蒸気温度,メタル温度の予測を可 能にした(図6参照)。

### 3.4 乱流燃烧解析技術

ボイラ火炉内では、乱流・石炭燃焼・ガス燃焼・粒子流動・ 輻射伝熱などの現象が複雑に相互作用するために、精度の 高いシミュレーションが困難であった。そこで、基礎実験、モデ リング、検証を繰り返して、物理現象の相互作用も考慮した 精密な物理モデルを構築し<sup>3)</sup>、このモデルを組み込んだ乱流 燃焼解析プログラムを開発した。特に、従来の標準的なk-ε乱 流モデルに替えて、LES乱流モデルを用いることで流動の精 度を高めた。

物理モデルの精度が高くても、実用的な時間で計算できな ければ意味がない。そこで、各モデルにおいて精度を維持し ながら、計算速度を高めるアルゴリズムを開発した。特に、輻 射伝熱やガス流動の計算アルゴリズムを工夫し、大規模並列 計算を高速に実行できるようにした。

この解析プログラムを小型燃焼炉に適用した結果を図7に 示す。燃焼炉を,最小1mm間隔のメッシュに分割し,約100万 分の1秒の時間刻みで非定常現象を計算した。燃焼炉内 に存在する粒子数は約300万個である。バーナ中心軸上の



図7 乱流燃焼解析の結果 火炉内の乱流・ガス燃焼・粒子燃焼・輻(ふく)射伝熱などの物理現象を精密 に計算し、燃焼性能を予測した。

温度と酸素濃度を実験結果と比較し、k-ε乱流モデルに比べてLESモデルの計算精度は著しく高いことを確認した。

## 4. 原子カシステムのシミュレーション

核分裂により発生したエネルギーを中性子の減速材である 軽水で冷却するBWR (Boiling Water Reactor:沸騰水型原子 炉)は、冷却材流量や制御棒挿入量の調整により、核分裂の 連鎖反応を維持している。炉心設計の分野では計算機を利 用したシミュレーションが不可欠であり、計算機利用技術の進 歩を促す原動力であった。

原子力システムでは、炉心内の中性子輸送現象だけでな く、冷却材の相変化を伴う伝熱流動現象、炉内機器・構造 物の流動振動現象など、多岐の物理現象の相互作用を解析 する必要がある。1,350 MWe級の改良型BWRであるABWR (Advanced Boiling Water Reactor:改良型沸騰水型原子炉) の製品開発に適用されたシミュレーション技術について以下に 述べる。

## 4.1 高耐震性インターナルポンプ解析

ABWRでは、冷却材を循環させるためにRIP(Reactor Internal Pump:原子炉内蔵型再循環ポンプ)を採用し、原子 炉再循環系のコンパクト化、安全性向上を図っている。RIPは、 原子炉圧力容器の下部において、ノズルによって支持される 構造になっている(図8参照)。ノズル構造の変更によって耐震 性能を向上することは重要であるが、ノズル形状の変更はポ ンプ水力性能を変化させるとともに、ポンプ下流の流動形態 を変え、炉内流動に影響を及ぼす可能性が考えられた。

その対応として縮小試験で解析精度を確認した流動解析 手法により、適切なノズル外径を設定し、RIP下流の流動特



## 注:略語説明 RIP (Reactor Internal Pump) **図8 原子炉内蔵型再循環ポンプ (RIP)**

RIPは原子炉圧力容器の下部にノズルによって支持されるため、ノズルは機器の信頼性において重要な部位である。



注:略語説明 CRD(Control Rod Drive)

図9 原子炉内蔵型再循環ポンプ(RIP)の流動解析 RIPおよび下部プレナムを模擬した流動解析により、厚肉スリーブノズルとして 最適な構造を決定し、高耐震RIPを実機に適用した。

性に及ぼす厚肉スリーブノズルの影響を評価した(図9参照)。 ノズル外径492 mm(従来ノズル外径445 mm)におけるRIP吐 出流は容器下流に沿って流れており、445 mmの流動形態と ほぼ同様であるが、550 mmではノズルテーパ部においてRIP 出口の流れが偏向し、445 mmの流動形態と相違することが わかった<sup>4</sup>。さらに実規模試験により、ノズル外径492 mmの実 機適用性を確認した。これらの開発は、電力会社各社との共 同研究で実施された。

このような検証を経て開発された先行プラントよりも肉厚を 約1.5倍増加させた高耐震性RIPは、北陸電力株式会社の 志賀原子力発電所2号機に最初に採用されている。

#### 4.2 フルMOX炉心核特性解析

ABWRは、これまでのBWRの建設、運転などの実績を踏ま えて、運転性、安全性、経済性をさらに向上させたものであ



注:略語説明 G(Gap), W(Water)

図10 径方向出力分布の解析値と測定値の比較

炉心(右上。四角が燃料棒に対応)の対角線方向の出力分布の比較である。 プルトニウム富化度分布や水ギャップ,水ロッドの存在によって複雑な分布と なっているが,解析値は測定値とよく一致している。

る。燃料集合体寸法は既存炉と同一で,チャネルボックス外部の非沸騰水領域を拡大し,水対燃料体積比を増加させて, MOX(Mixed Oxide:ウラン・プルトニウム混合酸化物)燃料の 利用に優れた炉心特性を有している。

通常のウラン燃料も燃焼に伴いPu(プルトニウム)が生成さ れ,燃焼末期におけるPuの核分裂反応への寄与割合は約 60%に達している。したがって,Puの核特性評価の妥当性は, これまでの運転実績により確認されていると言えるが,核設計 に対する信頼性向上の観点から,MOX燃料を用いた臨界 試験解析により,さらに核設計手法の検証を進めた<sup>5).60</sup>。なお, BWR核設計コードで臨界試験体系を解析するため,軸方向 の中性子漏洩(えい)は軸方向バックリング測定値により考慮 した。

フランスの臨界試験装置EOLEを用いて実施された,高減 速BWRフルMOX炉心を対象としたBASALA試験の燃料棒出 力分布の解析結果を図10に示す。BWR核設計コードの解析 値は,測定値とよく一致した。また,MOX炉心の臨界固有値, 反応度価値もウラン炉心と同等の解析精度で評価可能であ ることを確認した。

全炉心にMOX燃料が装荷可能なABWRである電源開発 株式会社大間原子力発電所は,2008年4月に設置許可を取 得し,5月に着工して現在建設が進められている。

#### 5. ガス遮断器のシミュレーション

#### 5.1 ガス遮断器の特徴と開発動向

遮断器は電力流通システムの保護機器として要となる装置 であり,送電系統の健全性を維持し,安定した電力供給を 担っている。落雷などによる系統故障時に電流を速やかに遮 断することで,発電機などの他の電力機器を保護する役目が ある。超高圧などの基幹系統には、消弧および絶縁性能に優 れたSF<sub>6</sub>(六フッ化硫黄)ガスを用いたガス遮断器(アークプラ ズマにSF<sub>6</sub>ガスを吹き付けて電流を遮断する装置)が適用され ている。現在、中国などのUHV(Ultra High Voltage)送電計 画や、北米の遮断容量増加の要求に対応するため、新型の 高電圧および大電流機種の開発を進めている。また、SF<sub>6</sub>ガス は地球温暖化係数がCO<sub>2</sub>の2万3,900倍と大きいことから、小 型化により、SF<sub>6</sub>ガスの使用量を削減することで環境負荷の低 減を推進している。

## 5.2 熱ガス流とアークプラズマの統合解析

新機種の開発にあたり、機構解析、電界解析、ガス流解 析などの性能解析ツールを活用し、開発試験回数の削減に よる開発期間の短縮を図っている。熱ガス流解析にアークプ ラズマ解析を組み込んだ最新の電流遮断シミュレーションにつ いて以下に述べる。

ガス遮断器は電極が開離してアークが発生した後, 商用 周波数の1サイクル前後で電流を遮断する。熱ガス流・アーク 統合解析では, このような短時間で行われる可動部の移動, アークによる発熱, 超音速流によるアークの冷却, 高温ガスの 排気を一連の動作として解析可能である(図11参照)。

熱ガス解析にはCIP(Constrained Interpolation Profile)法<sup>77</sup> を用いている。物体の移動は,移動速度の異なる物体の数 だけメッシュ空間をあらかじめ作成しておき,これらのメッシュ を重合させて各時刻での物体の体積占有率からガス空間 メッシュを求める方法をとっている。

アークプラズマ解析では、アークの導電率分布を考慮して



#### 注:略語説明 SF<sub>6</sub>(六フッ化硫黄) 図11 ガス遮断器の電流遮断動作

#### (a)固定電極と可動電極が接した状態から可動電極およびシリンダが移動, (b)電極が開離しアークが電極間に発生,(c)シリンダとピストンで囲まれたパッ ファ室を圧縮し高圧力を形成,(d)ノズル内で超音速流を発生させ,アークプラ ズマに吹き付けてアークを消弧し,アーク消弧後,高温のガスが下流側に排気 するまでの電流遮断動作を示す。

ポアソン方程式を解くことによりアーク電流密度を求めている。 また,アーク光の輻射・吸収およびノズル材のアブレーションを 考慮することで,アークによる発熱を精度よく計算できるように している。

# 5.3 UHV遮断器の解析結果

新型のUHV遮断器(定格1,100 kV, 50 kA)の開発におい て、このシミュレーションを適用し、遮断性能を検討した。新た に開発した遮断器では、従来器に比べて据付け容積を約 50%に縮小し、使用するSF。ガスの体積を約45%に低減して いる。従来の抵抗遮断方式における補助遮断部を省略して いるため、遮断責務が厳しいものとなる。熱ガス流・アーク統 合解析により、大電流遮断後の対地および極間の絶縁回復 特性を解析し、十分な性能を有していることを確認した(図12 参照)。なお、IEC(International Electrotechnical Commission) 規格に準拠した形式試験を第三者機関において実施し、十 分な遮断性能を有することを検証した<sup>80</sup>。

## 6. おわりに

ここでは、電力分野の主要製品である蒸気タービン、石炭 燃焼ボイラ、原子力システム、ガス遮断器の研究開発におい て、実証試験に先立ち活用されているシミュレーション技術に ついて述べた。

電力分野における製品の研究開発においては,経済性と 環境負荷低減の観点から,さらなる高効率化と信頼性,安全 性の向上が求められている。日立グループは,今後も最先端 のシミュレーション技術を駆使して,これらの要求に応えていく 考えである。

## 執筆者紹介



**岩重 健五** 1983年日立製作所入社,電力グループ エネルギー・環境 システム研究所 ターボ機械研究開発センタ 電力流通プ ロジェクト 所属 現在,流体機械,回転電機の研究開発に従事 工学博士 日本機械学会会員



**済武 久司** 1992年日立製作所入社,電力グループ エネルギー・環境 システム研究所 ターボ機械研究開発センタ 蒸気タービン プロジェクト 所属 現在,蒸気タービンの研究開発に従事 ターボ機械協会会員,日本ガスタービン学会会員



青山 肇男 1979年日立製作所入社,電力グループ エネルギー・環境 システム研究所 原子カシステムプロジェクト 所属 現在,沸騰水型軽水炉炉心システムの研究開発に従事 工学博士 日本原子力学会会員



#### 図12 大電流遮断直後のガス遮断器タンク内のガス温度分布

シールドから排出される高温ガスの温度分布の解析例を示す。高温ガスの温度が電気絶縁上問題とならないレベルであることを確認した(遮断電流:50 kA, アーク継続時間30 ms)。

# 参考文献

- 1)藤井,外:最適反動翼を採用した高効率蒸気タービン,日立評論,89,2, 168~171(2007.2)
- 2) M. Handa, et al.:Three-dimensional Analysis of Large Shell-andtube Heat Exchangers at High Temperatures, CHT-08 Advances in Computational Heat Transfer(2008)
- 3)山本,外:LESによる微粉炭燃焼解析,日本伝熱学会論文集, Vol.15, No.4(2007)
- 高橋,外:ABWRインターナルポンプ下流の流動特性に及ぼすノズル径の 影響, Vol.2000, No.1, p.651~652 (2000.7)
- 5) 石井:BWR核設計コードによるMOX臨界試験EPICUREおよびMISTRALの 解析,日本原子力学会,Vol.5,No.1(2006)
- 6) 笹川,外:BWR核設計コードによるBASALA臨界試験の解析,日本原子 力学会2005秋の大会,E65(2005)
- 7) T. Yabe: The Constrained Interpolation Profile Method for Multiphase Analysis, J. Comput. Phys., 169, pp.556-593 (2001)
- 8) 逸見, 外:1,100 kV 50 kA二点切ガス遮断器の開発, AEパワーレビュー, Vol.1, p.20~23(2008.7)



山本 研二 1995年日立製作所入社,電力グループ エネルギー・環境 システム研究所 石炭科学プロジェクト 所属 現在,石炭燃焼ボイラの研究開発に従事 工学博士 日本機械学会会員



**浦井一** 1997年日立製作所入社,電力グループ エネルギー・環境 システム研究所 電力流通プロジェクト 所属 現在,ガス遮断器の研究開発に従事 博士(工学) 電気学会会員,IEEE会員