

地球シミュレータ産業利用シンポジウム 2011

2011年10月19日

# 流体構造大規模連成解析を用いた 高性能タービン翼設計法の開発

株式会社東芝

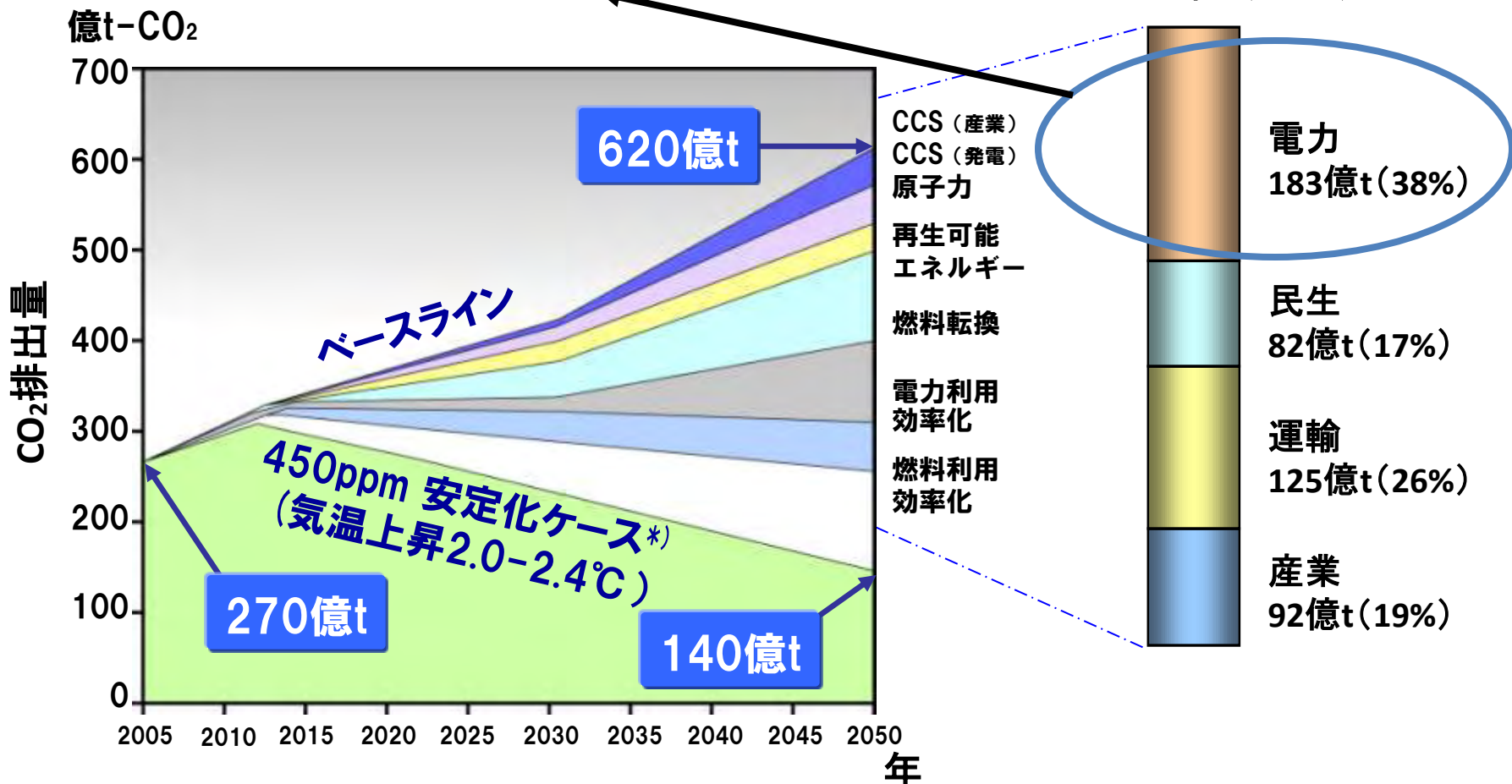
東北大学

帝京大学

# 本研究の必要性: CO<sub>2</sub>排出量削減施策(IEA)における 電力システムの目標

電力システムの更なる効率向上が求められている

削減量  
480億t(100%)

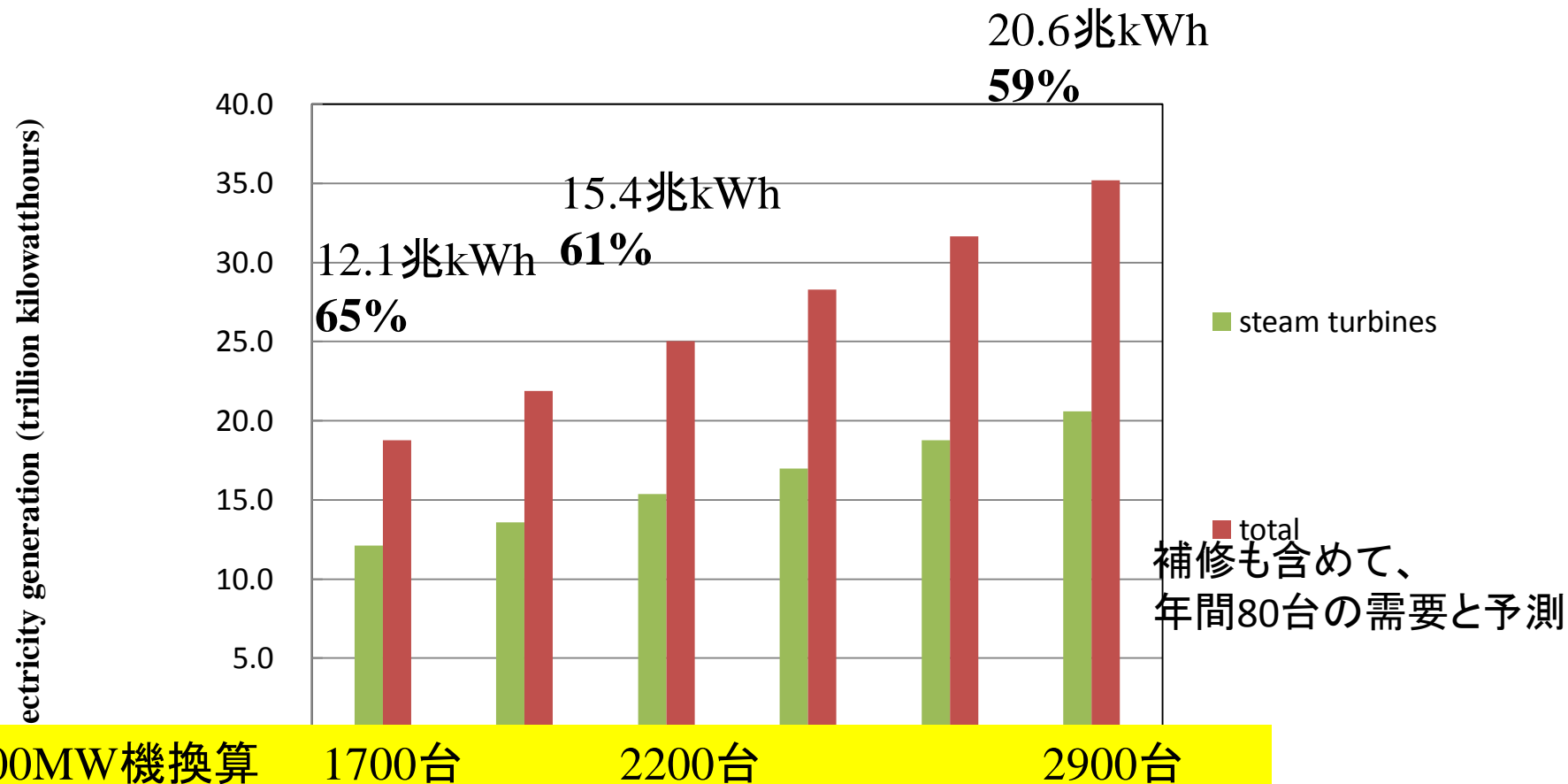


エネルギー起源のCO<sub>2</sub>排出量の予測

出典:「Energy Technology Perspectives 2008」IEA(2008-6-6)

\*) IPCC 第4次評価報告書 第3作業部会報告書 カテゴリー I

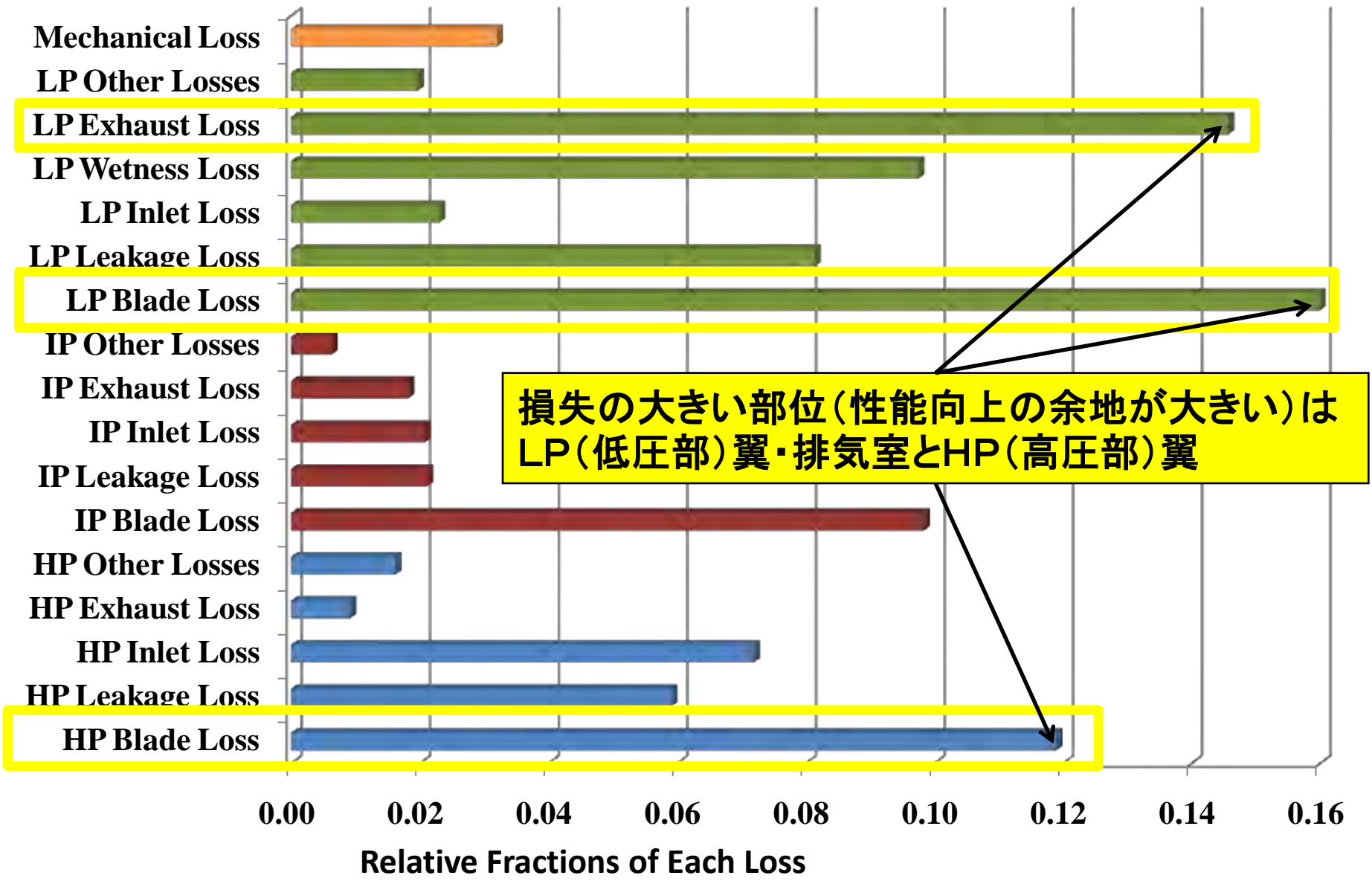
# 本研究の必要性：発電用蒸気タービンの需要動向



(assumed from DOE/EIA, International Energy Outlook 2010, May (2010))

**世界の全電力需要の半分以上は蒸気タービンが担っている。  
⇒ 蒸気タービンの性能向上は今後も重要な課題**

# 本研究の必要性： 発電用大型蒸気タービンの損失分析<sup>1)</sup>

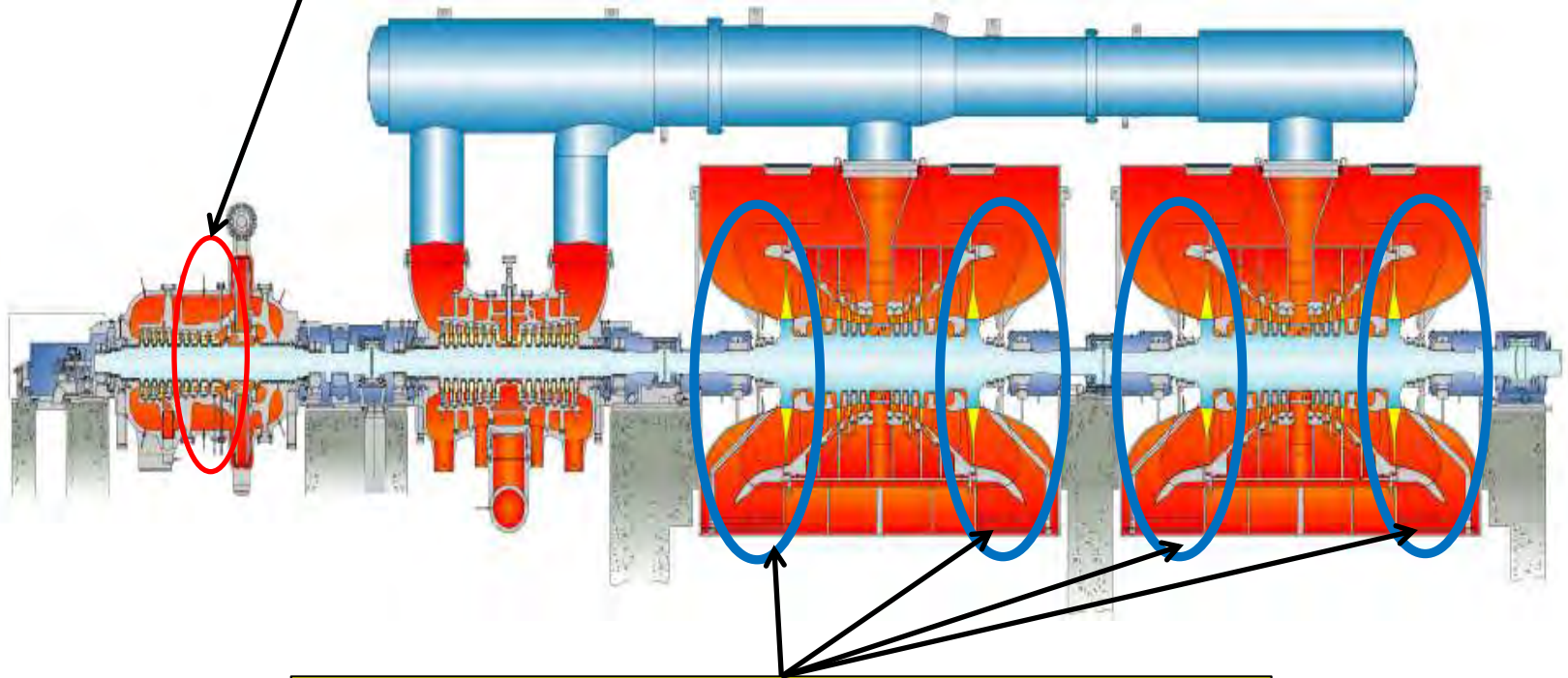


損失の大きい部位 (性能向上の余地が大きい) は LP (低圧部) 翼・排気室と HP (高圧部) 翼

# 本研究のスコープ

高圧部初段翼

典型的な発電用大型蒸気タービン(1000MW級)



低圧部長翼・排気ディフューザ

# 平成22年度地球シミュレータ産業戦略利用プログラムの概要

戦略分野 環境負荷低減技術の開発・評価シミュレーション

テーマ タービン動翼非定常流体力の高精度大規模CFD解析法の開発

## 目的

1. 火力及び原子力発電用大型蒸気タービンの性能向上及び稼働率向上
2. 発電由来のCO<sub>2</sub>削減の推進

## 概要

- ① 蒸気タービンの部分負荷から設計負荷の範囲の条件で、大規模CFD解析を実施して、動翼に負荷される非定常流体力を評価
- ② 非定常流体力発生メカニズムを明らかにして、非定常流体力低減のための検討を実施
- ③ 非定常流体力予測精度向上と動翼形状改良の性能向上効果を評価

# プロジェクト人員体制

## プロジェクト責任者

川崎 栄 (東芝 蒸気タービン設計部門)

新関 良樹(東芝 電力社会システム技術開発センター)

## 現場責任者

小林 孝雄 (東芝インフォメーションシステムズ)

## プログラム作成

山本 悟 (東北大学大学院 情報科学研究科 教授)

## プログラム移植・最適化・計算実行

笹尾 泰洋 (東北大学大学院 情報科学研究科 助教)

高田 真司 (東北大学大学院 情報科学研究科 山本研M1)

## 計算条件設定、計算実行、計算結果と試験結果の比較、結果の評価と考察、 開発設計への反映

田沼 唯士 (帝京大学 ジョイントプログラムセンター)

新関 良樹 (東芝 電力社会システム技術開発センター)

渋谷 直紀 (東芝 電力社会システム技術開発センター)

## プリ/ポスト処理、計算結果と試験結果の比較

田沼 唯士 (帝京大学 ジョイントプログラムセンター)

渡邊 諭 (東芝インフォメーションシステムズ)

# 高圧初段の技術課題と対策

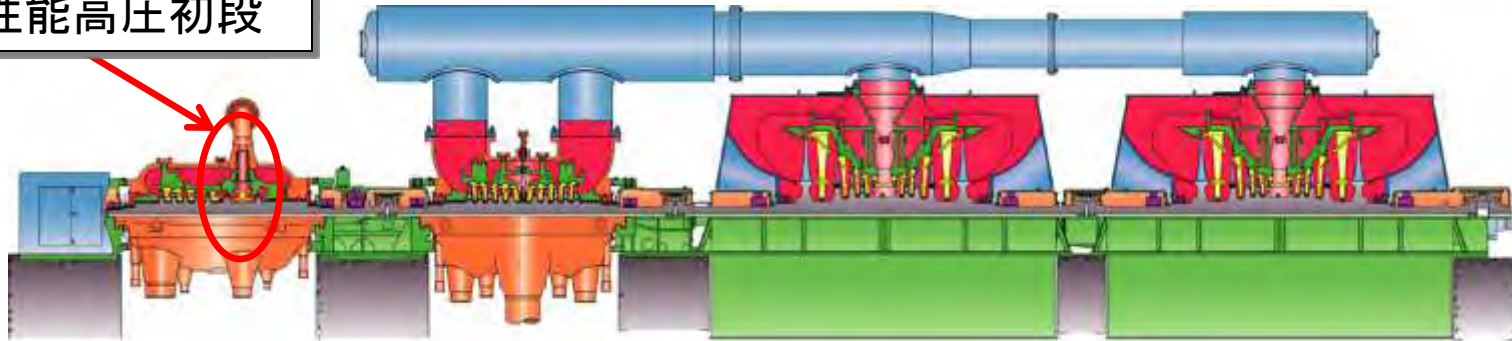
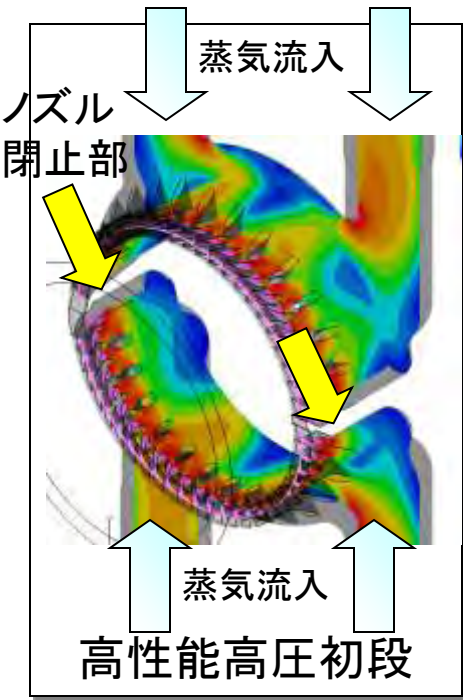
## 技術課題:

高圧初段ノズル閉止の影響は下流動翼翼列に非定常損失を引き起こす。水平部閉止部損失は他の損失に比較して非常に大きく、更に動翼に加わる非定常流体力が大きい。

対策:ノズル閉止の影響を求め、別途平行して進めている構造検討を合わせて、損失を低減し、同時に動翼への非定常流体力を低減する。

方法:閉止部の静翼から動翼への影響を評価するために、半周または全周を対象とした大規模非定常CFD解析を実施

1. 地球シミュレータによる大規模非定常流体解析を実施
2. 東北大学山本教授の数値タービンシステムを利用





# 基礎式<sup>2)-7)</sup>

1. Three Dimensional Unsteady Compressible Navier-Stokes equations
2. The fundamental equations :conservation laws of total density, momentum, total energy, water vapor density, liquid water density, and the number density of water droplets.

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial F_i}{\partial \xi_i} = \frac{1}{Re} S + H \quad (i = 1, 2, 3)$$

$$\begin{array}{c}
 \left[ \begin{array}{c} \rho_v \\ \rho u_1 \\ \rho u_2 \\ \rho u_3 \\ e \end{array} \right] \\
 O = J
 \end{array}
 \cdot
 \begin{array}{c}
 \left[ \begin{array}{c} \rho_v U_i \\ \rho u_1 U_i + \partial \xi_i / \partial x_1 p \\ \rho u_2 U_i + \partial \xi_i / \partial x_2 p \\ \rho u_3 U_i + \partial \xi_i / \partial x_3 p \\ (e + p) U_i \end{array} \right] \\
 F_i = J
 \end{array}
 \cdot
 \begin{array}{c}
 \left[ \begin{array}{c} 0 \\ \tau_{1j} \\ \tau_{2j} \\ \tau_{3j} \\ \tau_{i;u_i} + (\kappa + \kappa^t) \partial T / \partial x_i \\ 0 \\ 0 \\ \sigma_{kj} \\ \sigma_{\omega j} \end{array} \right] \\
 S = J \frac{\partial \xi_i}{\partial x_j} \frac{\partial}{\partial \xi_i}
 \end{array}
 +
 \begin{array}{c}
 \left[ \begin{array}{c} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ \Gamma \\ \rho l \\ S_k \\ S_\omega \end{array} \right] \\
 H = J
 \end{array}$$

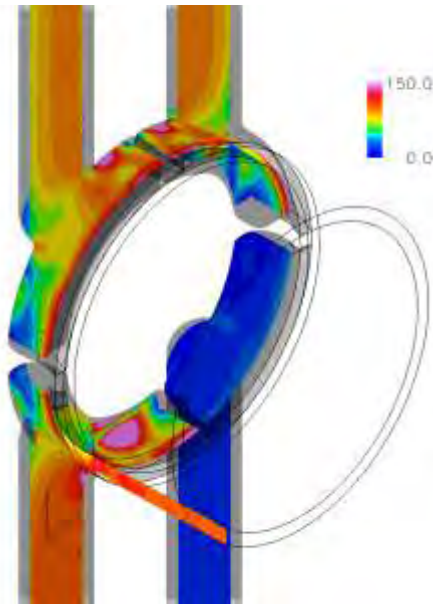
Q: vectors of unknown variables F: vectors of flux S: the viscous terms H: the source terms of condensation, evaporation and turbulence  $S_\kappa$   $S_\omega$ : the source terms of SST

Wet Steam Flow Terms (低圧部の湿り蒸気流れ解析に必要)

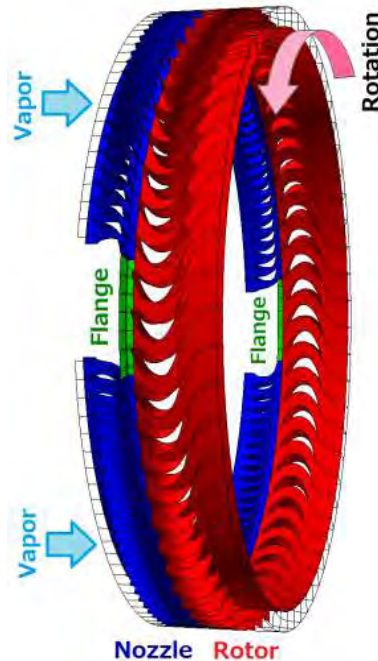
# Flow Modeling and CFD Scheme

1. Turbulence Model: The Shear Stress Transport (SST) Turbulence Model<sup>8)</sup>
2. CFD Scheme: High-order High-resolution Finite-difference Method Based on the Fourth-order Compact MUSCL TVD Scheme, Roe's Approximate Riemann Solver, and the LU-SGS Scheme<sup>9)</sup>.
3. Wet Steam Flow: Mathematical Models for None-equilibrium Condensation

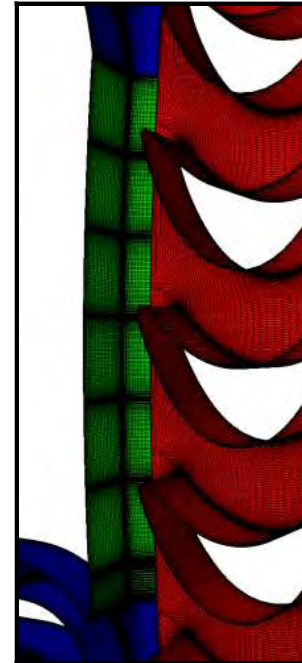
# 部分流入段形状と計算格子



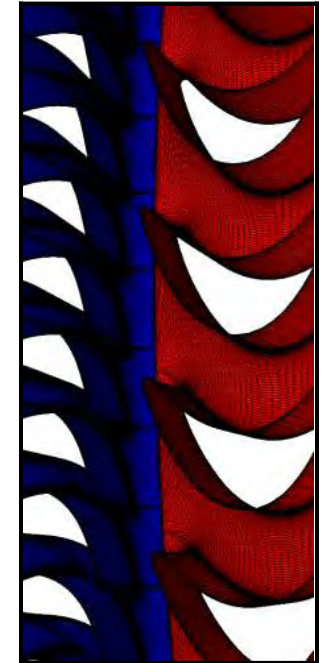
(a) 部分流入段形状と解析例（流速分布）<sup>10)</sup>



(b) 計算格子俯瞰図



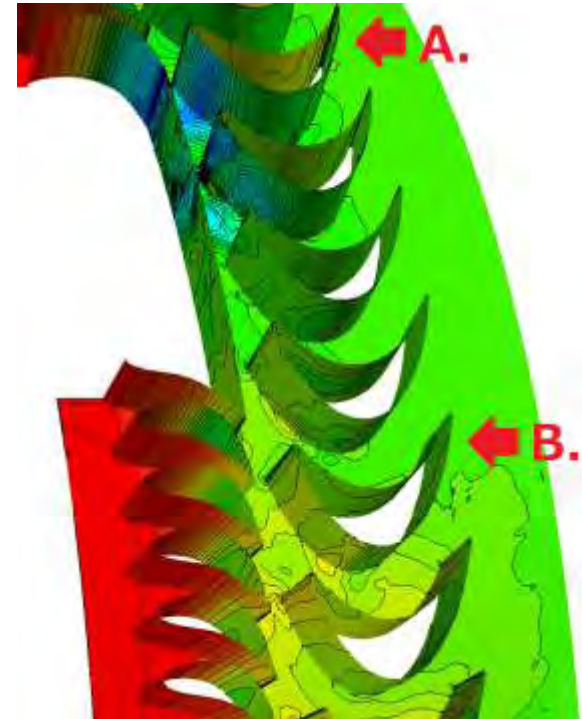
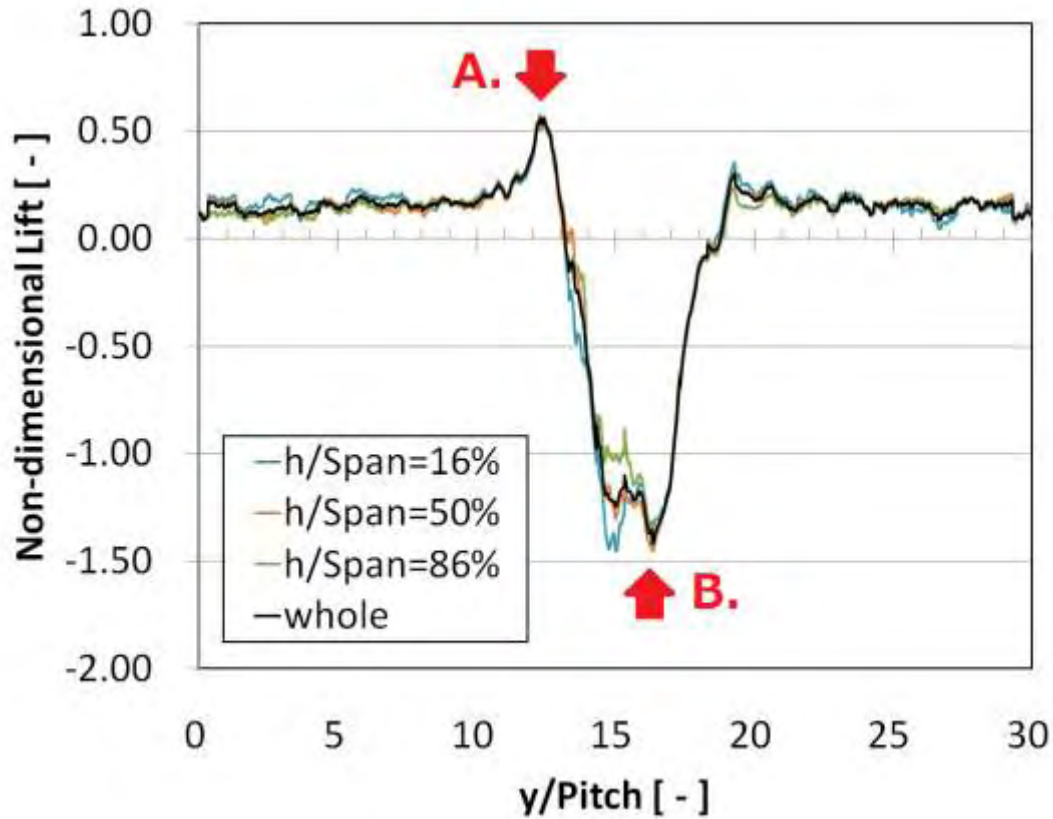
(c) 閉部周辺



(d) 静翼のある翼列蒸気通路部

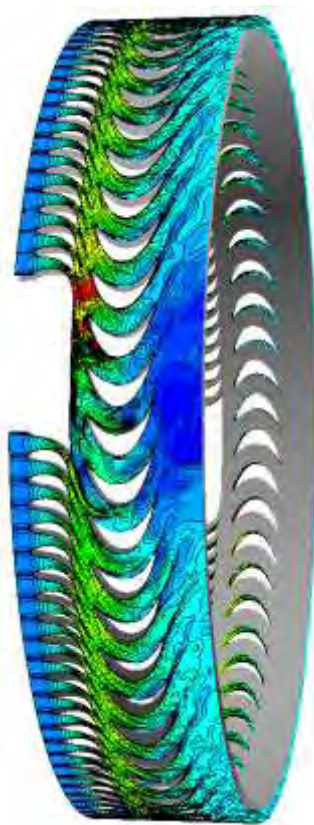
水平部に静翼閉止部がある初段半周分の静動翼3次元非定常流れ解析を実施

# 動翼に働く非定常流体力(左)と壁面瞬間静圧分布(右)

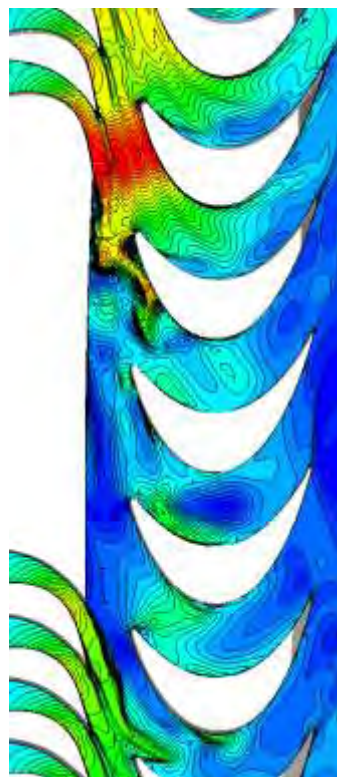


動翼が閉止部を通過して再び静翼下流に位置する瞬間(B)に大きなブレーキ力(動翼の回転と反対方向の力)が加わる。

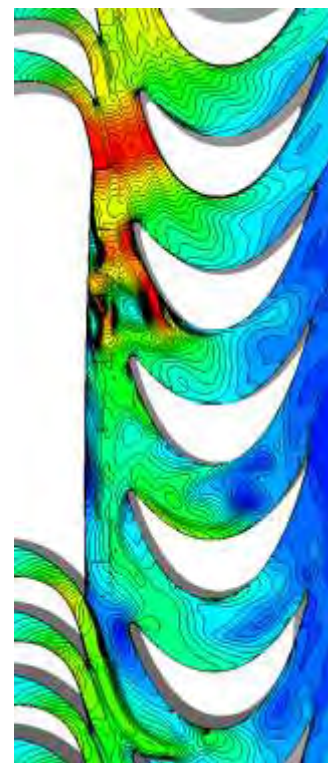
## 各断面の瞬間Mach数分布



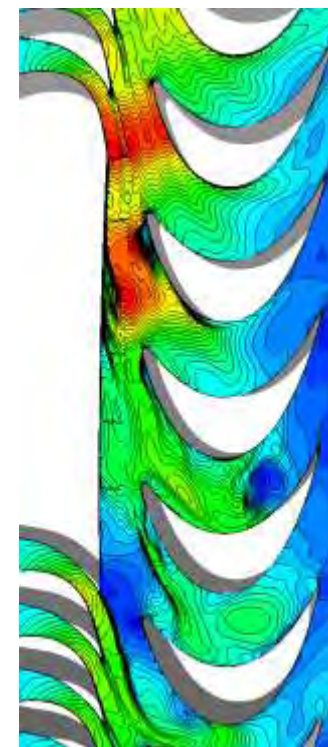
全体図



ルート付近



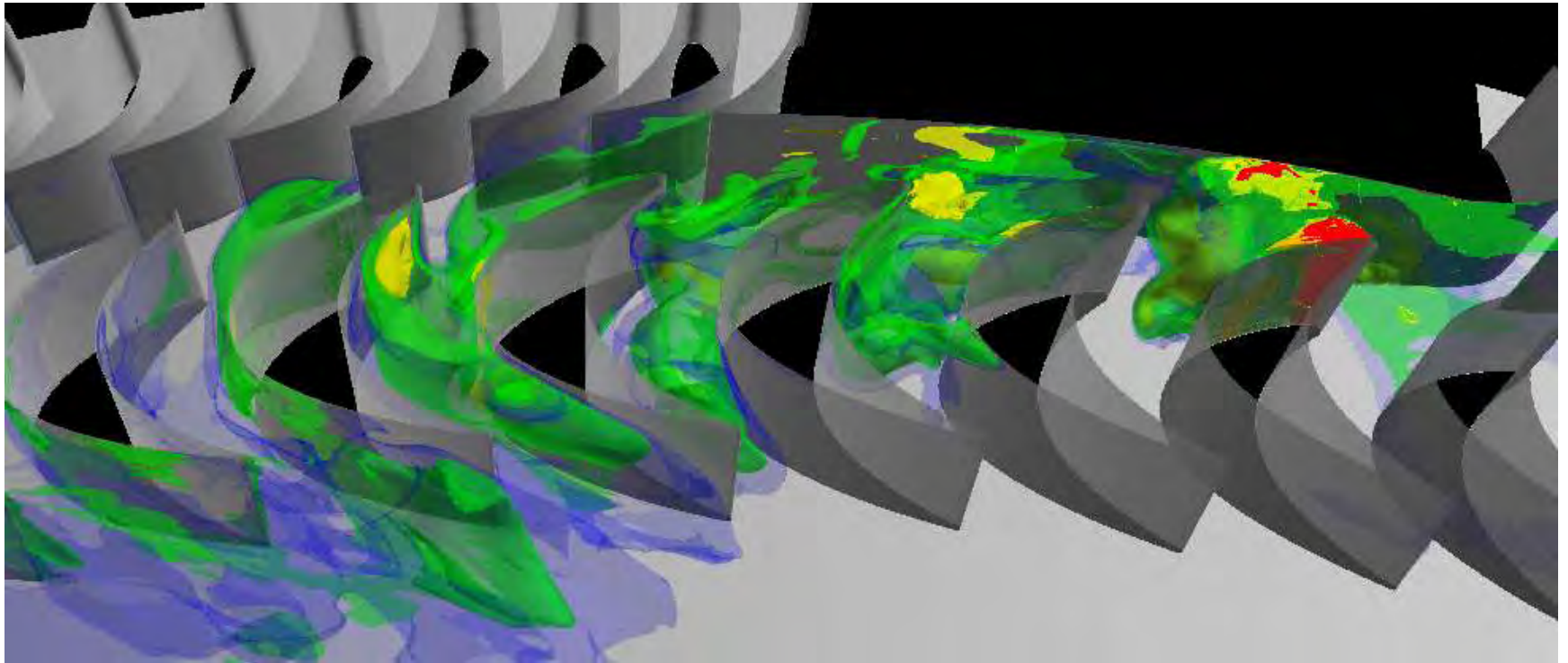
中央



先端付近

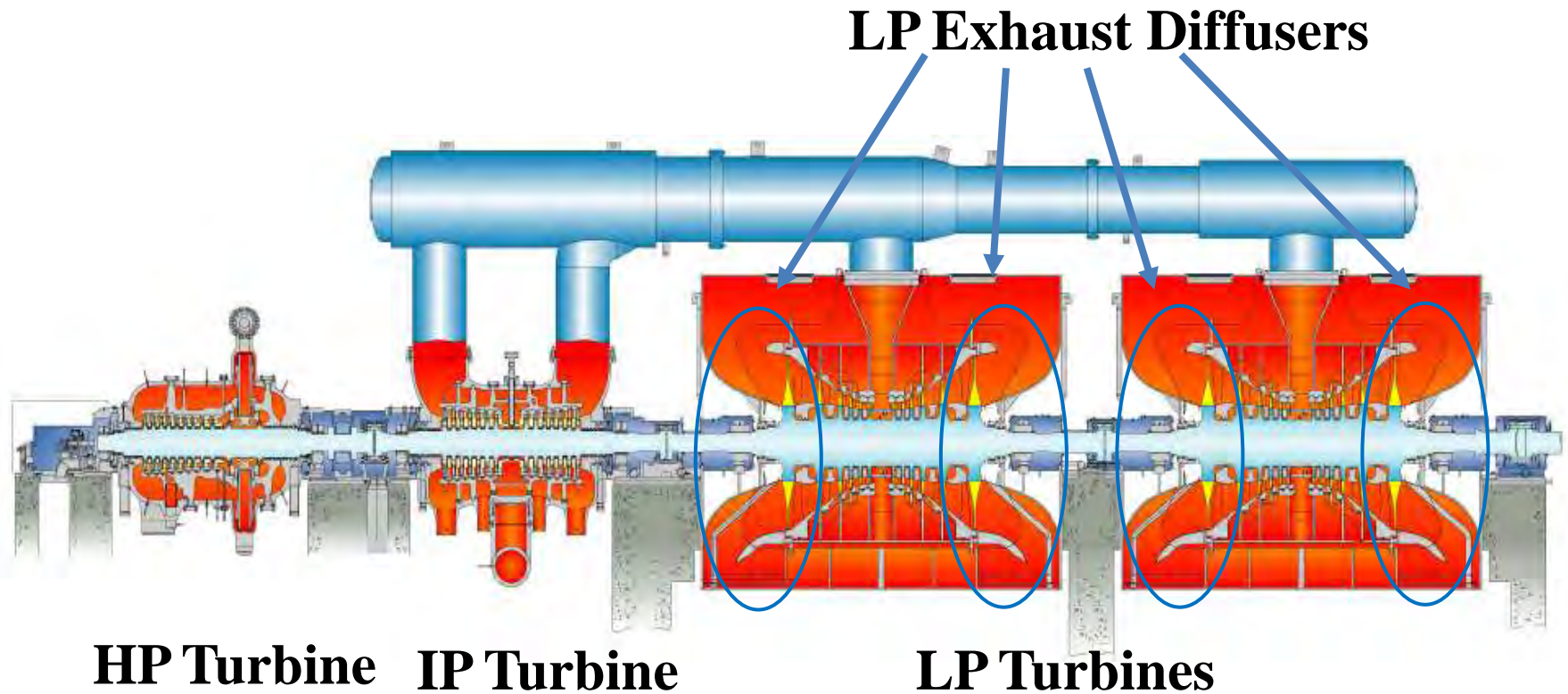
閉止部下流の動翼ルート付近はほとんど流れがないが、中央及び先端付近にはある程度蒸気が流入している。

# エントロピー増加量の3次元分布



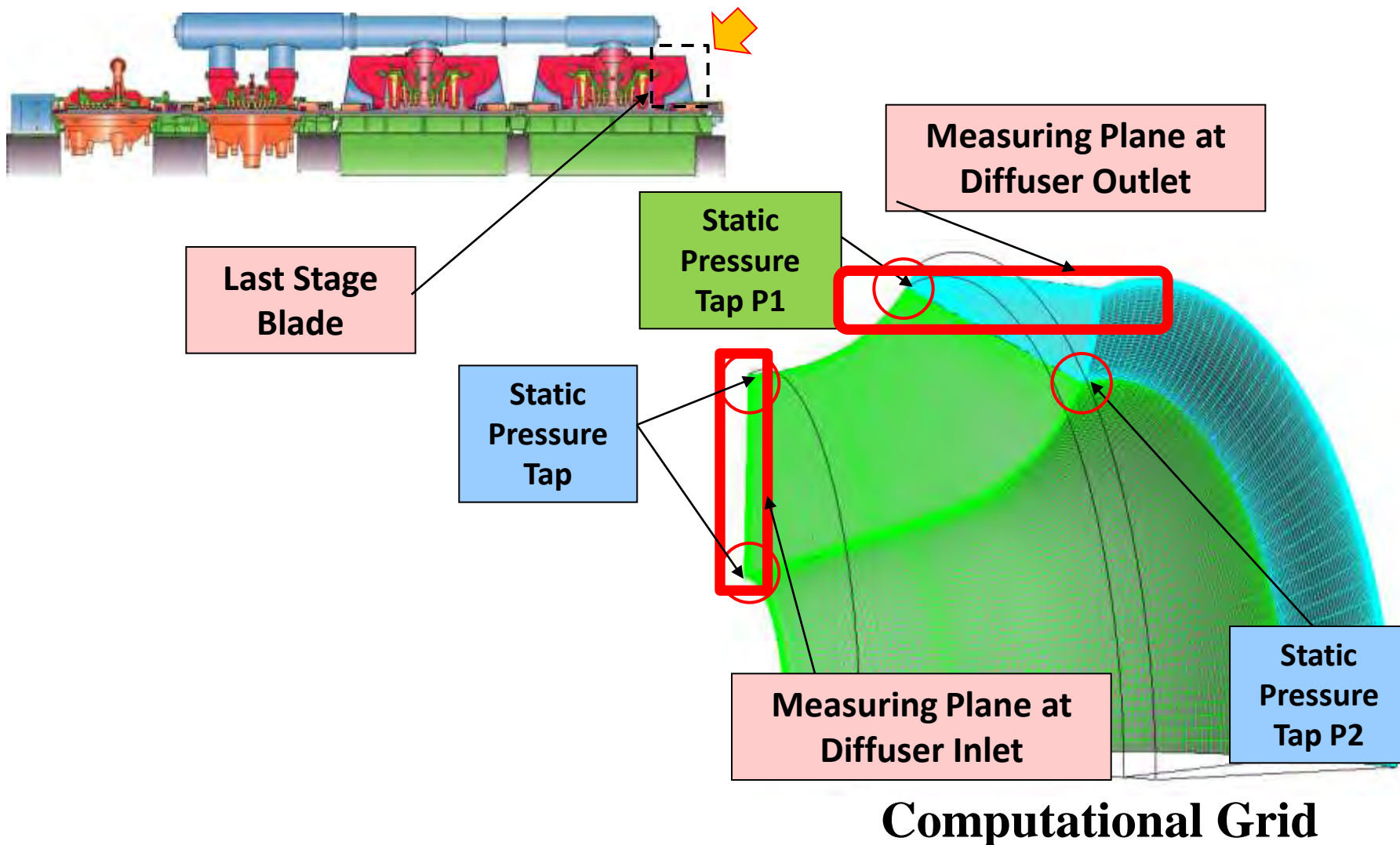
流れの乱れと損失が大きい部分（赤が大、青が少）が可視化されている

# 低圧排気ディフューザの技術課題と対策



1. タービン全長のみでも40m近い大きさで、軸方向スパンのコンパクト化の要請が強い(ロータたわみの防止、車室変形防止、ロータの製造制限、コスト低減)
2. 前述の制約により排気ディフューザの最適設計(最適拡大率、最適長さ)が困難

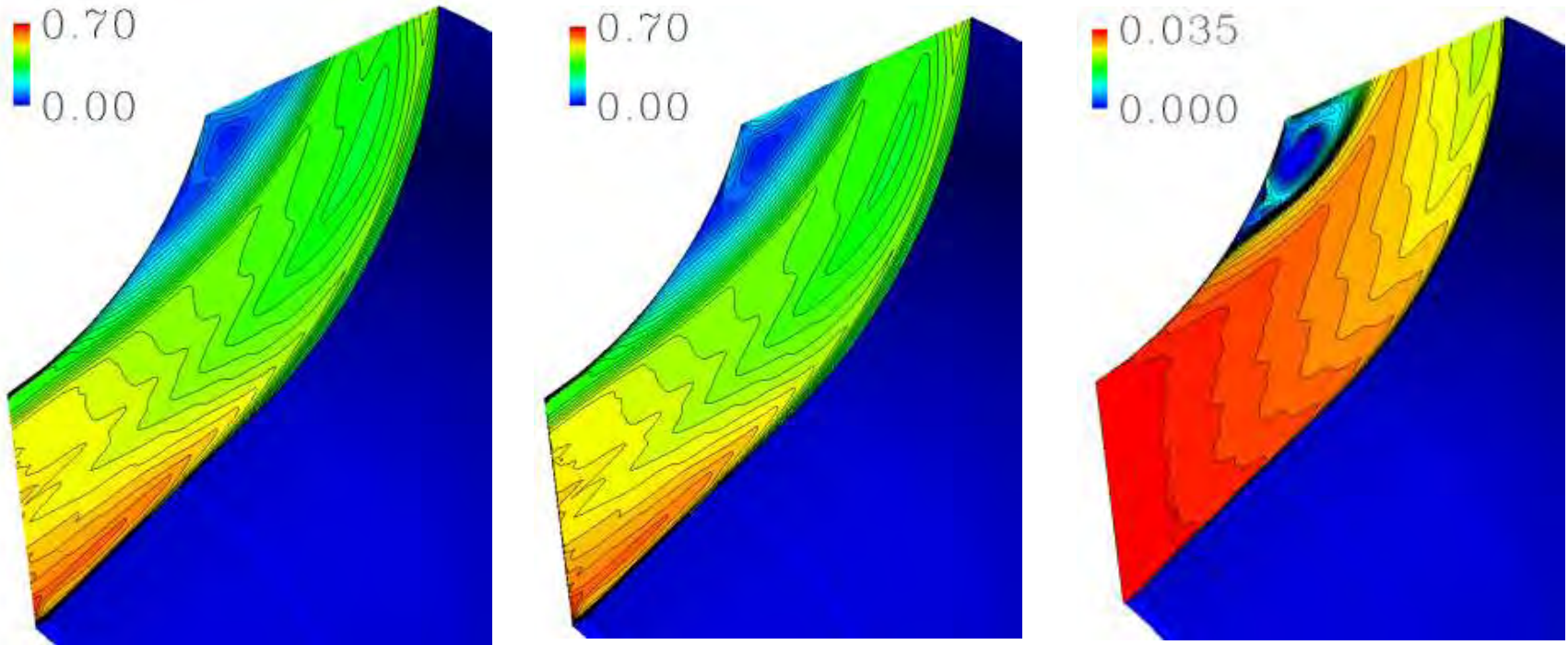
# 低圧排気ディフューザの解析格子と実機計測位置



湿り蒸気流れの解析と実機計測結果を比較



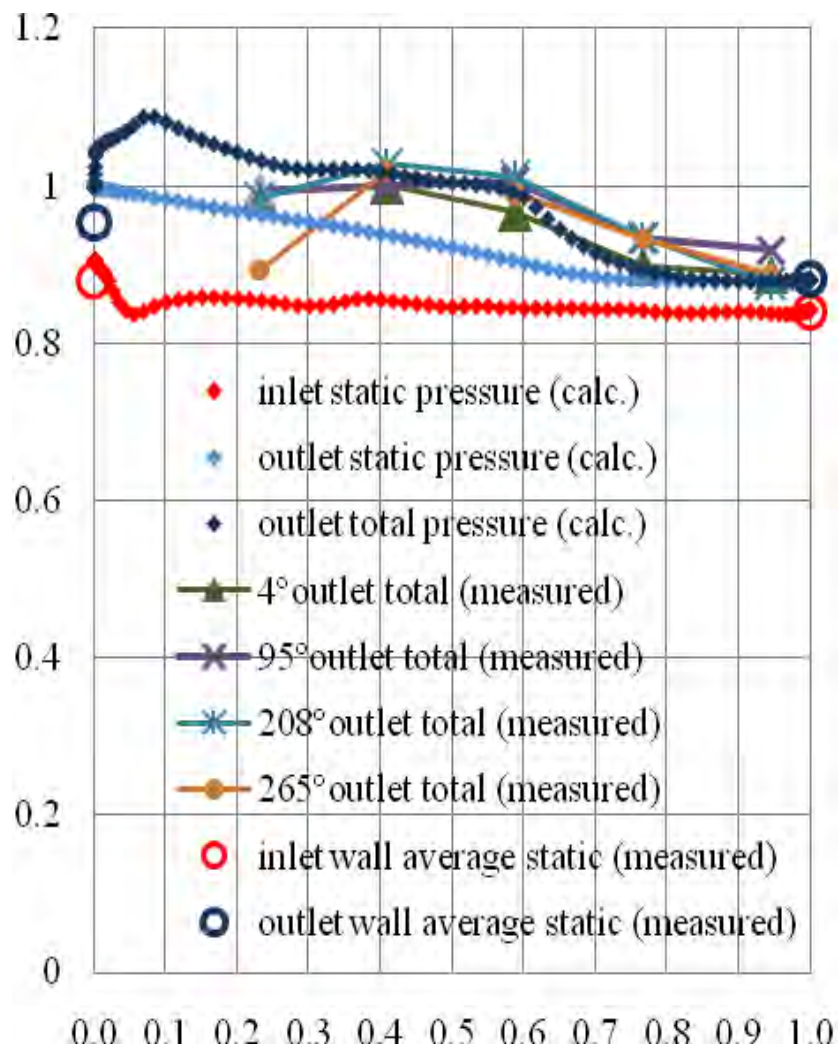
# 排気ディフューザ解析結果



湯き蒸気条件での解析結果：マッハ数分布（左）

湿り蒸気条件での解析結果：マッハ数分布（中）、湿り度分布（右）

# ディフューザ圧力分布解析結果と計測値との比較



解析結果は計測値と良好に一致

## 結論と波及効果

1. 平成22年度の研究成果を用いることにより、設計負荷運転時の上流翼列後流及び上流周方向不均一流れによる非定常流体力の計算予測精度の向上を図ることができ、流動現象のメカニズムの解明により設計改善に有効な知見を得ることができる見通しを得た。
2. 部分負荷運転時の周方向不均一流れによる非定常流体力の計算予測精度の向上、メカニズムの解明については、引き続き地球シミュレータを用いた研究を平成23年度も継続することとした。
3. 上記1、2の成果を反映した高性能蒸気タービンの開発、実用化を行うために必要な実機データを用いた解析法の検証を行い、ディフューザ流れに関しては検証を完了した。

# 参考文献

- 1) Tanuma, T., Sasao, Y., Yamamoto, S., Takada, S., Niizeki, Y., Shibukawa, N. and Saeki, H., “Numerical Investigation of Exhaust Diffuser Performances in Low Pressure Turbine Casings”, ASME Turbo Expo GT2011-45677, 2011.
- 2) Ishizaka, K., Ikohagi, T. and Daiguji, H., “A High-Resolution Numerical Method for Transonic Non-Equilibrium Condensation Flow through a Steam Turbine Cascade”, Proc. of the 6th ISCFD, 1, pp. 479-484, 1995.
- 3) Frenkel, J., “Kinetic Theory of Liquids”, Dover, 1955.
- 4) Young, J. B., “An Equation of State for Steam for Turbomachinery and Other Flow Calculations”, Trans. ASME, J. Eng. Gas Turbines Power, 110, pp. 1-7, 1998.
- 5) Gyarmathy G., “Zur Wachstumsgeschwindigkeit kleiner Flüssigkeitstropfen in einer übersättigten Atmosphäre”, Zeitschrift für angewandte Mathematik und Physik, 14-3, pp. 280- 293, 1963.
- 6) Roe, P.L., “Approximate Riemann Solvers, Parameter Vectors, and Difference Schemes”, Journal of Computational Physics, 43, pp. 357-372, 1981.
- 7) Yamamoto, S. and Daiguji H., “Higher-Order-Accurate Upwind Schemes for Solving the Compressible Euler and Navier-Stokes Equations”, Computers and Fluids, 22-2/3, pp. 259-270, 1993.
- 8) Menter, F.R., “Two-equation Eddy-viscosity Turbulence Models for Engineering Applications”, AIAA Journal, 32-8, pp. 1598-1605, 1994.
- 9) Yoon, S. and Jameson, A. “Lower-upper Symmetric-Gauss-Seidel method for the Euler and Navier-Stokes equations”, AIAA Journal, 26, pp. 1025-1026, 1988.
- 10) 田沼唯士、佐々木隆、新関良樹、CFDを活用した高性能蒸気タービンの開発設計、東芝レビュー, 62, 9, pp. 22-29, 2007.