



開発設計現場での機械系CAE活用の経験と これからの「ものづくり設計」におけるCAEの役割

帝京大学 ジョイントプログラムセンター
応用流体力学・エネルギー機械系
元 株式会社東芝 京浜事業所 原動機部
田沼 唯士

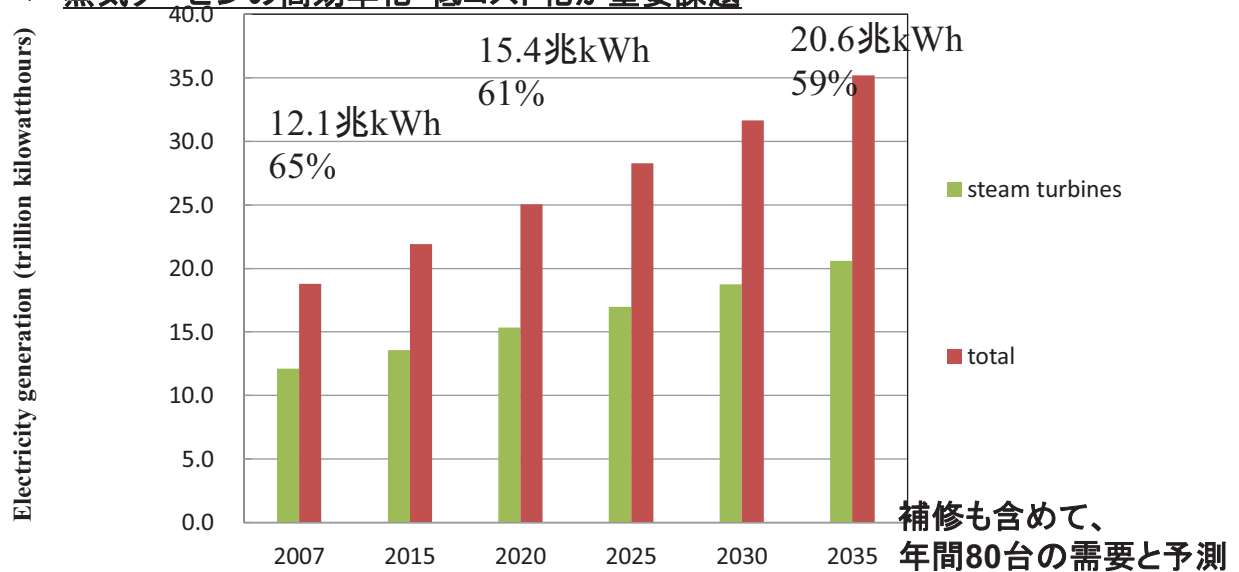
目次

- I. 発電用蒸気タービン設計における機械系CAE活用
 1. 発電用蒸気タービン設計の目的
 2. 火力発電システムと蒸気タービンの構成
 3. 蒸気タービンの設計プロセスとCAE
 4. 技術課題とCAEの活用:性能向上
 5. 技術課題とCAEの活用:コスト低減
- II. これからの「ものづくり設計」におけるCAEの役割と大学

1. 発電用蒸気タービン設計の目的:

発電用蒸気タービンの需要動向

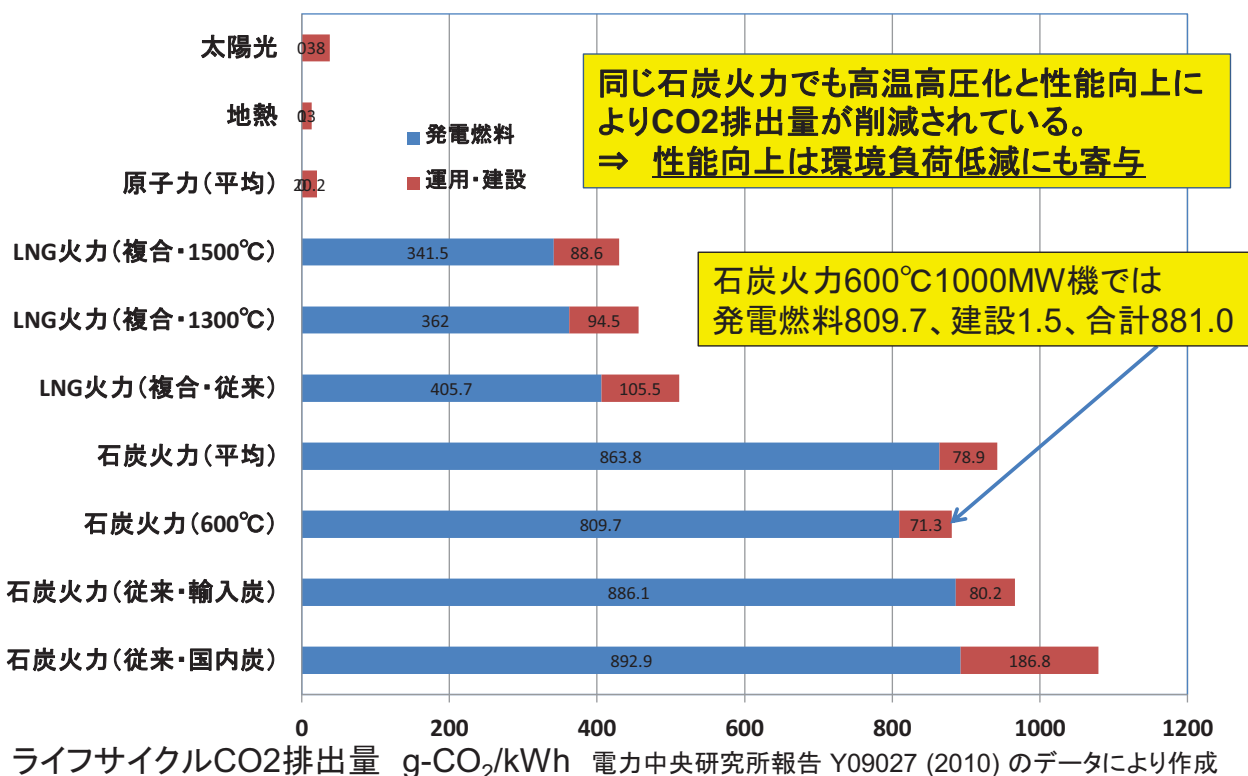
石炭火力、天然ガス火力、原子力で使用される蒸気タービンの需要は今後も増加
 ⇒ 蒸気タービンの高効率化・低コスト化が重要課題



1000MW機換算	1700台	2200台	2900台
-----------	-------	-------	-------

World Electricity Generation with Steam Turbine Power Generation Systems (assumed from DOE data²⁾)

1. 発電用蒸気タービン設計の目的: 発電方式別CO2排出量



同じ石炭火力でも高温高压化と性能向上によりCO2排出量が削減されている。
 ⇒ 性能向上は環境負荷低減にも寄与

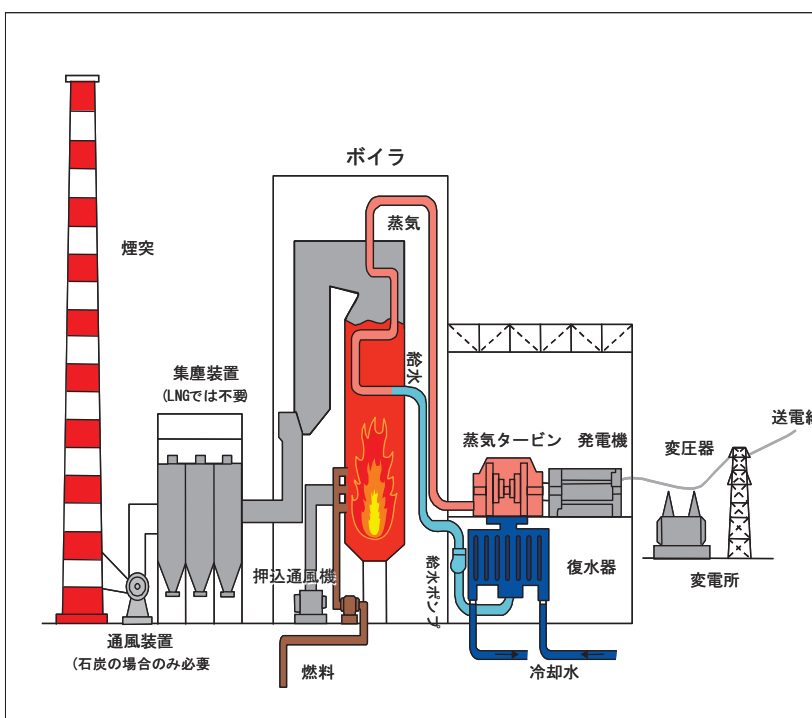
石炭火力600℃1000MW機では
 発電燃料809.7、建設1.5、合計881.0

1. 発電用蒸気タービン設計の目的: 求められる特性

1. 蒸気タービンの需要は今後も増加（供給量増大）
蒸気タービンによる発電量は2035年には2007年比で約1.7倍
100万kw機換算で約2000台相当（2035年までの今後25年間の累積値）
2. CO₂排出量が大きい石炭火力機の需要が多く、一層の性能向上が必要 ⇒性能向上
3. Non-OECD諸国の需要が大きく、コスト低減が必須 ⇒コスト低減

2. 火力発電システムと蒸気タービンの構成: 火力発電プラント

火力発電プラントの仕組み



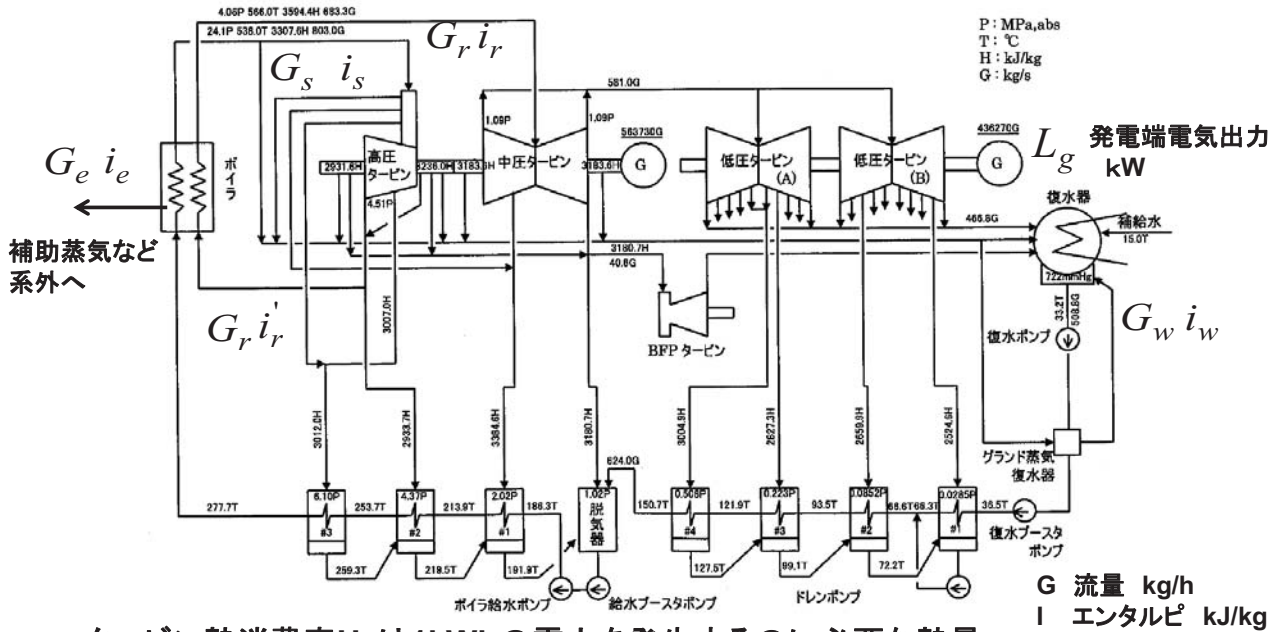
火力発電所全景



蒸気タービン・発電機



2. 火力発電システムと蒸気タービンの構成： ヒートバランス(1000MW機の例)



タービン熱消費率 H_R は1kWhの電力を発生するのに必要な熱量

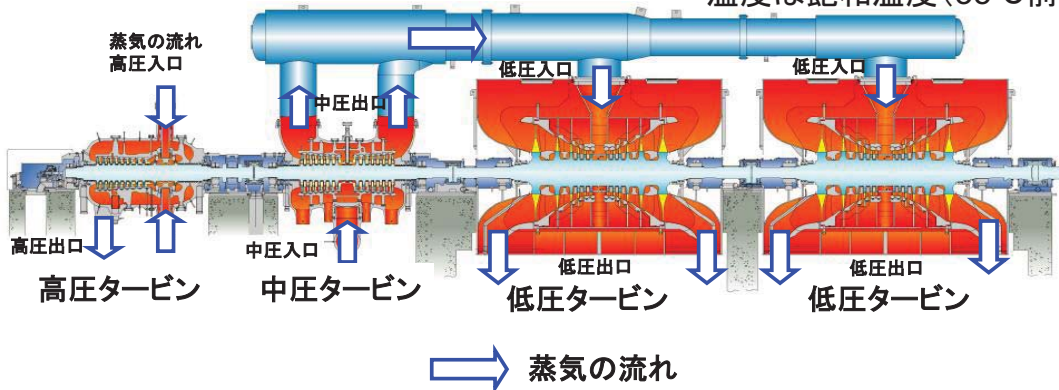
$$H_R = \frac{Q}{L_g} = \frac{G_S i_S - G_W i_W + G_r (i_r - i'_r) - G_e i_e}{L_g}$$

2. 火力発電システムと蒸気タービンの構成： 蒸気タービンの構成

高圧タービン 入口温度600°C、入口圧力25MPa

中圧タービン 入口温度610°C、中圧入口約5MPa

低圧タービン 入口温度約300°C、入口圧力1MPa以下 出口圧力5kPa程度
温度は飽和温度(35°C前後)

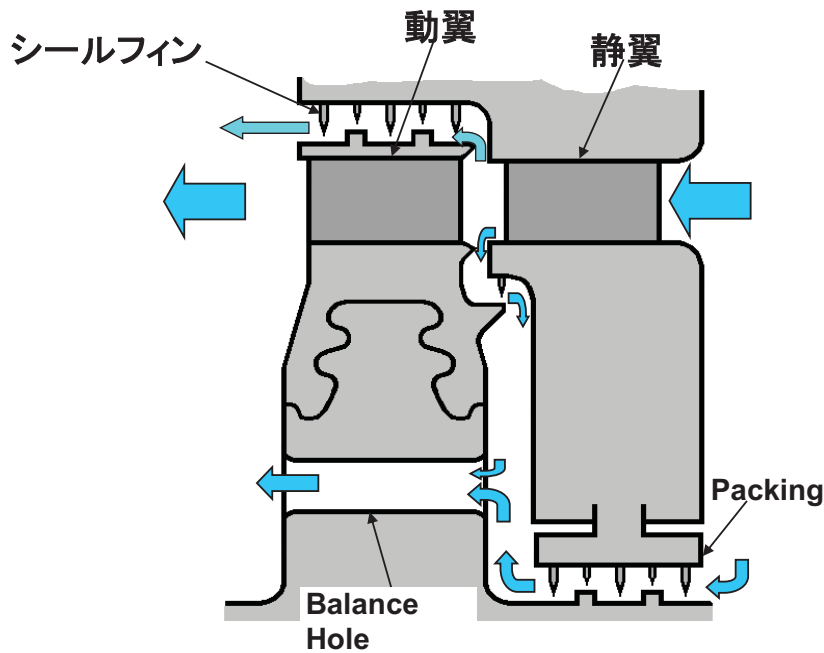


全長約38m、タービン全重量約1000トン ⇒ 原価に占める材料費の割合が非常に大きい

発電用大容量蒸気タービン断面図例 (1000MW級機)

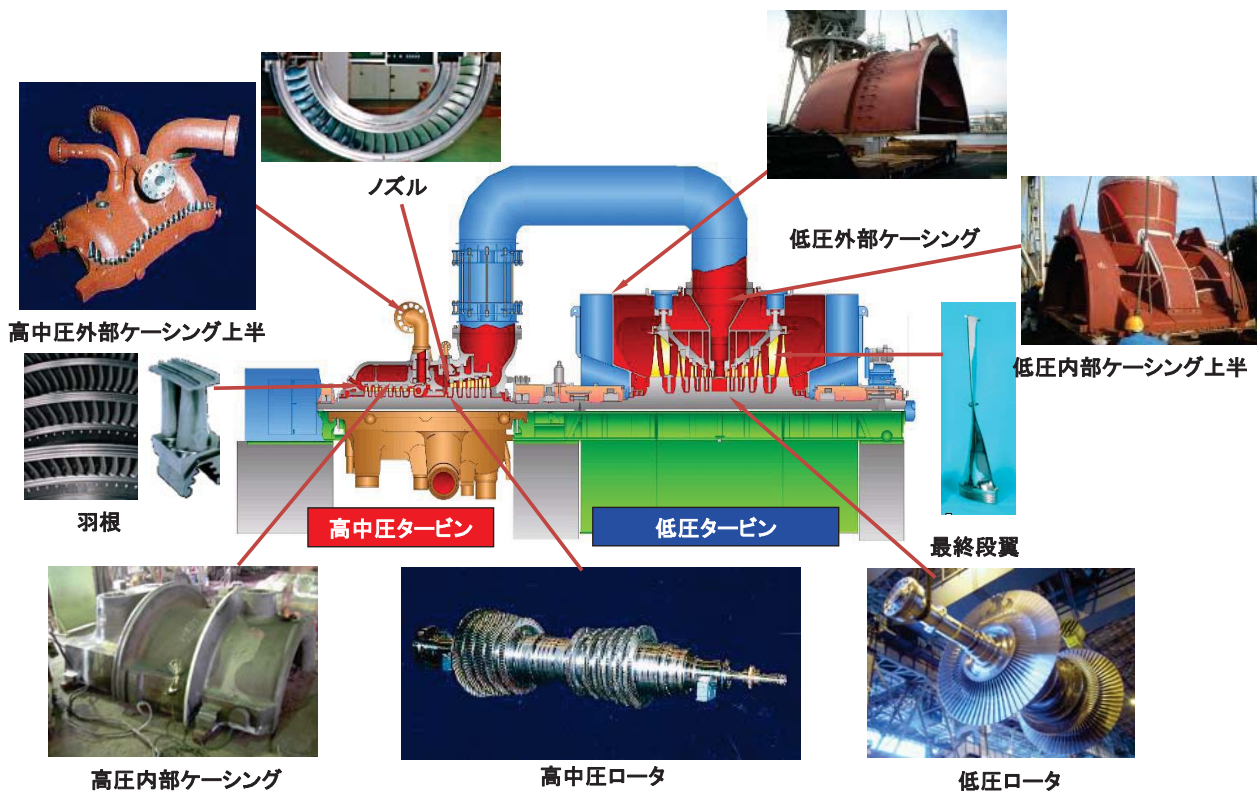
2. 火力発電システムと蒸気タービンの構成： 蒸気タービン段落構造（衝動設計の例）

静翼と動翼の組み合わせで高温高圧蒸気のエネルギーを
回転エネルギーに変換

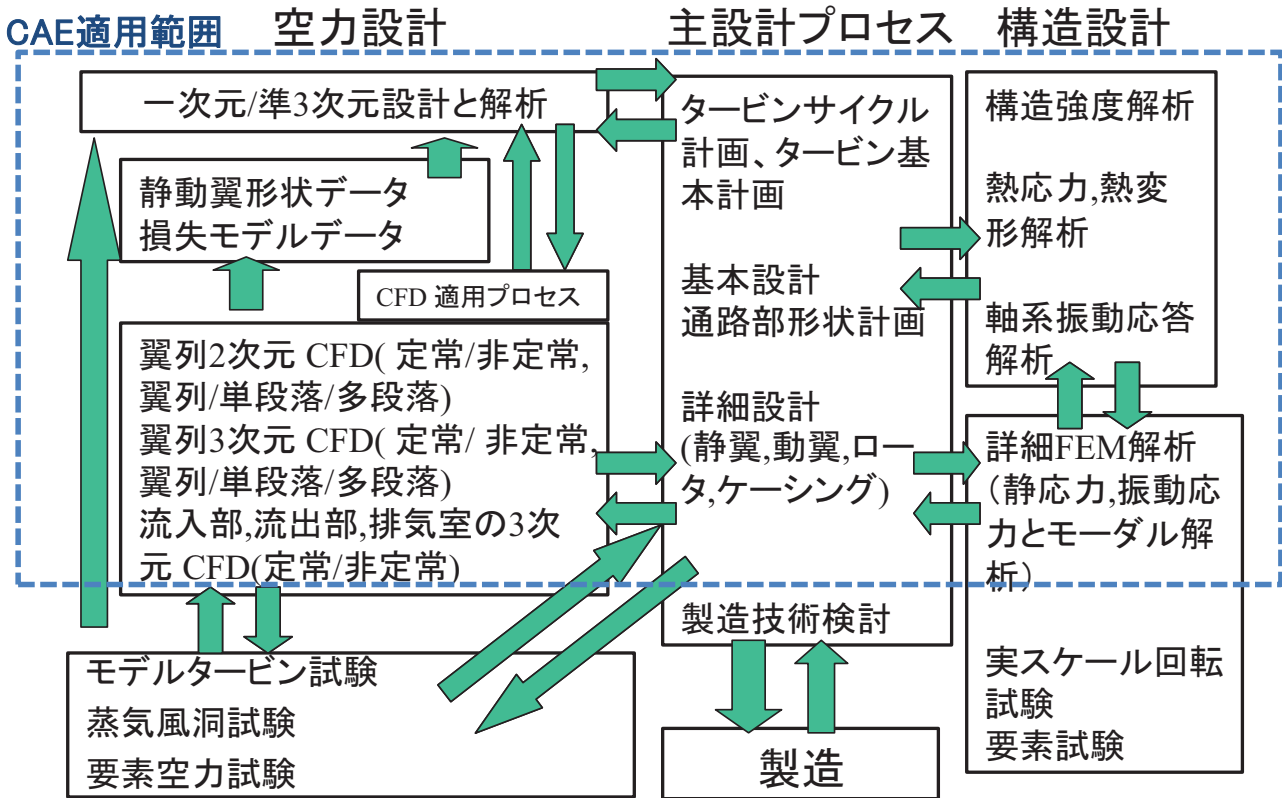


回転部と静止部の間隙からの漏洩を制御する工夫をしている

2. 火力発電システムと蒸気タービンの構成： 蒸気タービンの部品構成

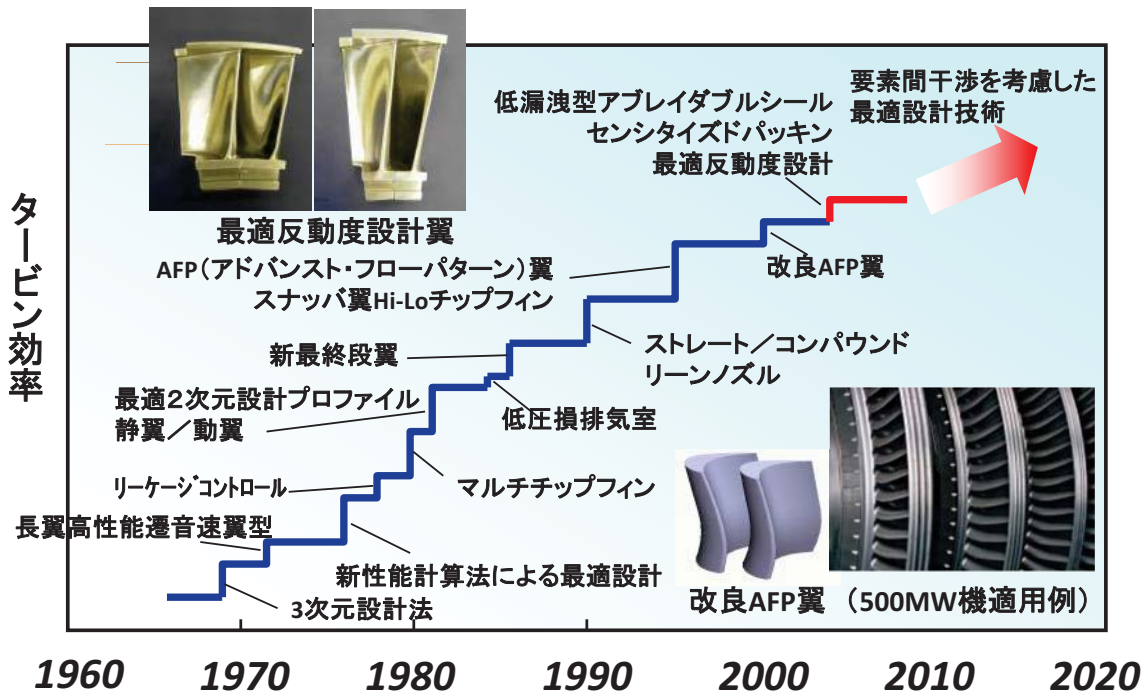


3. 蒸気タービンの設計プロセスとCAE

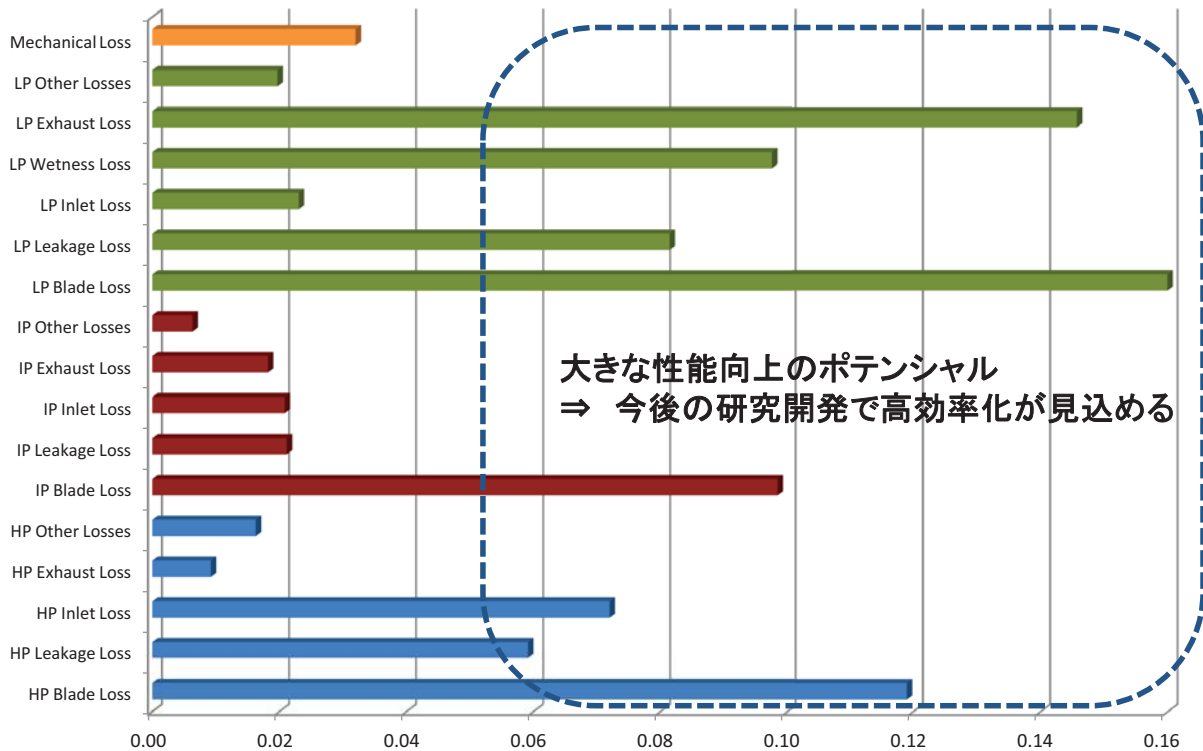


4. 技術課題とCAEの活用: 性能向上 蒸気タービン性能向上技術の進展

モデル試験とCFDを用いて性能向上要素技術、設計技術開発が進展



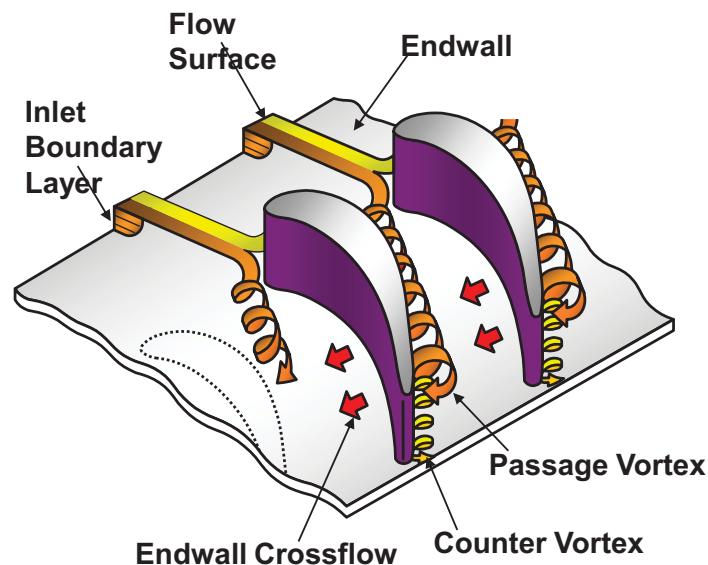
4. 技術課題とCAEの活用：性能向上 大型蒸気タービンの損失の構成例



4. 技術課題とCAEの活用：性能向上 翼列損失の原因と低減法

二次流れ損失：翼列壁面近くに発生する渦群による損失

壁面境界層⇒馬蹄形渦を形成⇒翼背側と腹側の圧力差で二次流れ渦を形成



Schematic Drawing of Secondary Flow

4. 技術課題とCAEの活用:性能向上 翼列損失の原因と低減法

1. 動翼及び静翼に湾曲形状(コンパウンドリーン形状)を採用
2. 流出角分布を調整して壁面近くの流量を中央にシフト

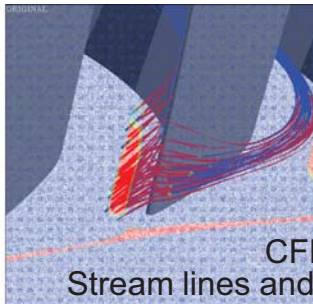


Advanced Flow Pattern (AFP)設計翼

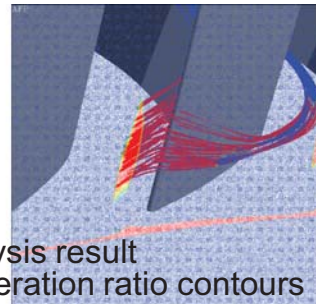


実機中圧部に採用されたAFP動翼

Original blading



AFP blading

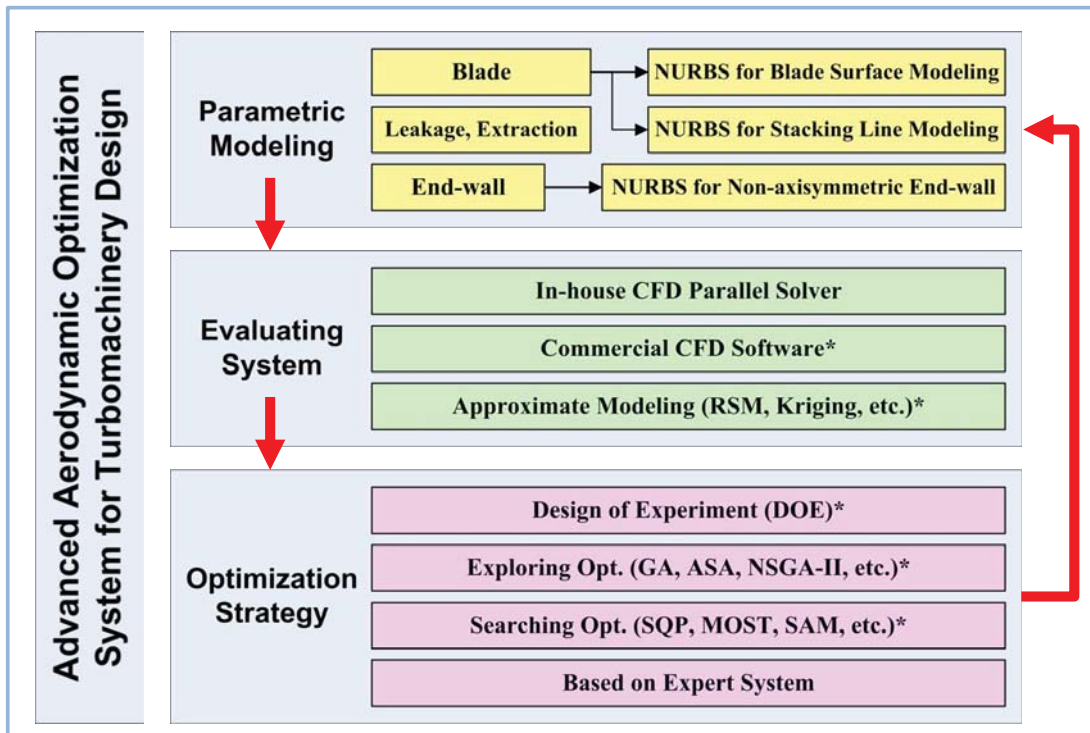


二次流れ渦の生成が抑制され、損失が低減されている

CFD stage analysis result
Stream lines and entropy generation ratio contours

4. 技術課題とCAEの活用:性能向上 3次元翼最適設計システム概要

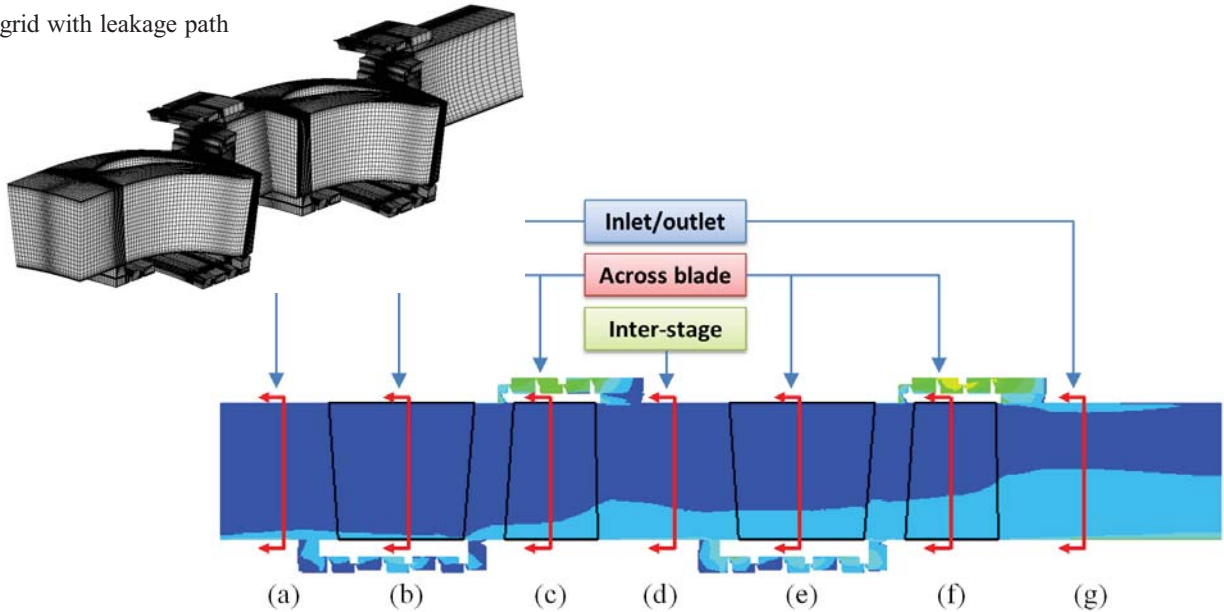
* Using commercial software modules



4. 技術課題とCAEの活用:性能向上 多段落3次元翼列最適設計

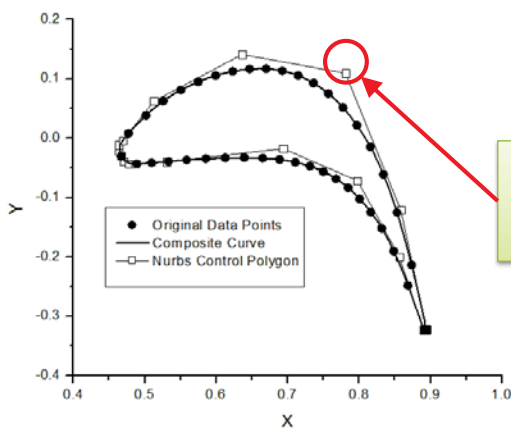
多段静動翼列の3次元翼型の曲面形状設計を漏洩流れも含むCFDによる性能評価を繰り返して最適化

CFD grid with leakage path

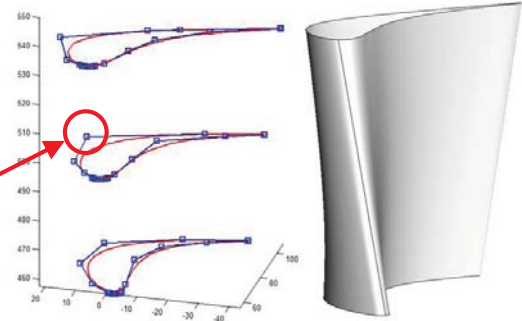


Monitoring sections along the turbine stages.

4. 技術課題とCAEの活用:性能向上 翼型をNURBS方程式で定義して自動設計



Design Variables



Parametric blade profiles

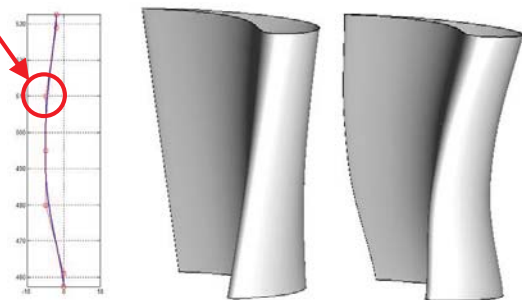
NURBS curve point position

Control point coordinates

$$A(u) = \frac{\sum_{i=0}^n N_{i,p}(u)\omega_i P_i}{\sum_{i=0}^n N_{i,p}(u)\omega_i}$$

p-th B-spline function

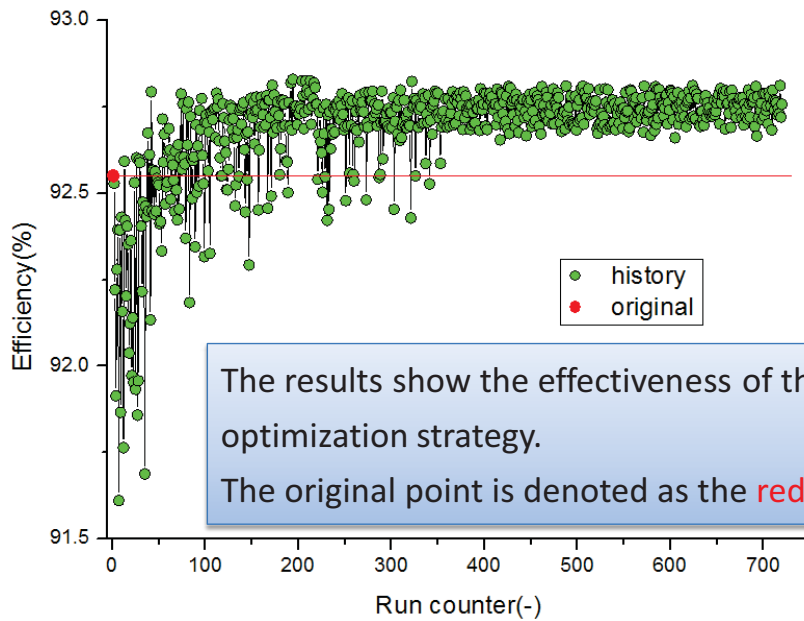
Weight



Parametric blade stacking line

4. 技術課題とCAEの活用:性能向上 遺伝アルゴリズムを応用した性能向上形状探索例

Non-dominated sorting genetic algorithm (NSGA)-II studies

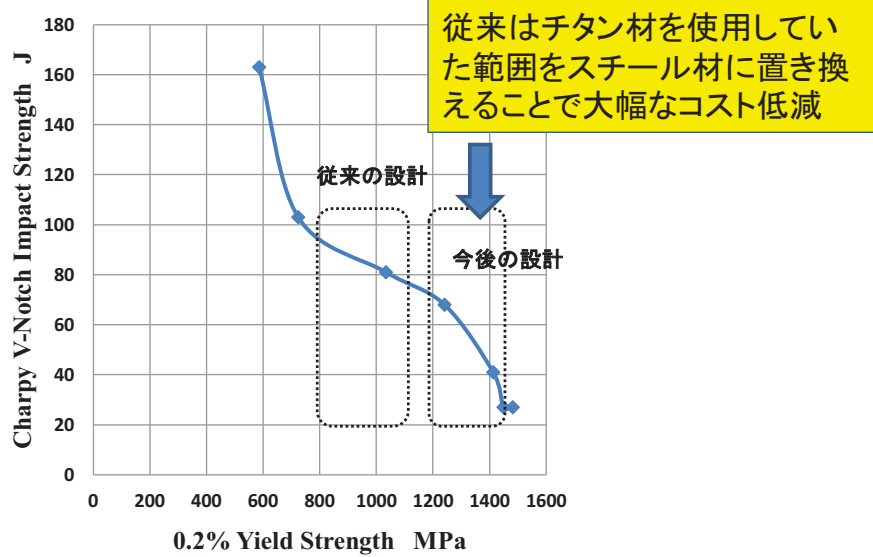


Efficiency optimization history for two-stage steam turbine.

5. 技術課題とCAEの活用:コスト低減 発電システムの低コスト化

1. 発電システム全体のライフサイクルコスト評価
2. コンポーネントの原単位削減
3. 仕様の適正化
4. 適切な設計費、研究開発費の確保

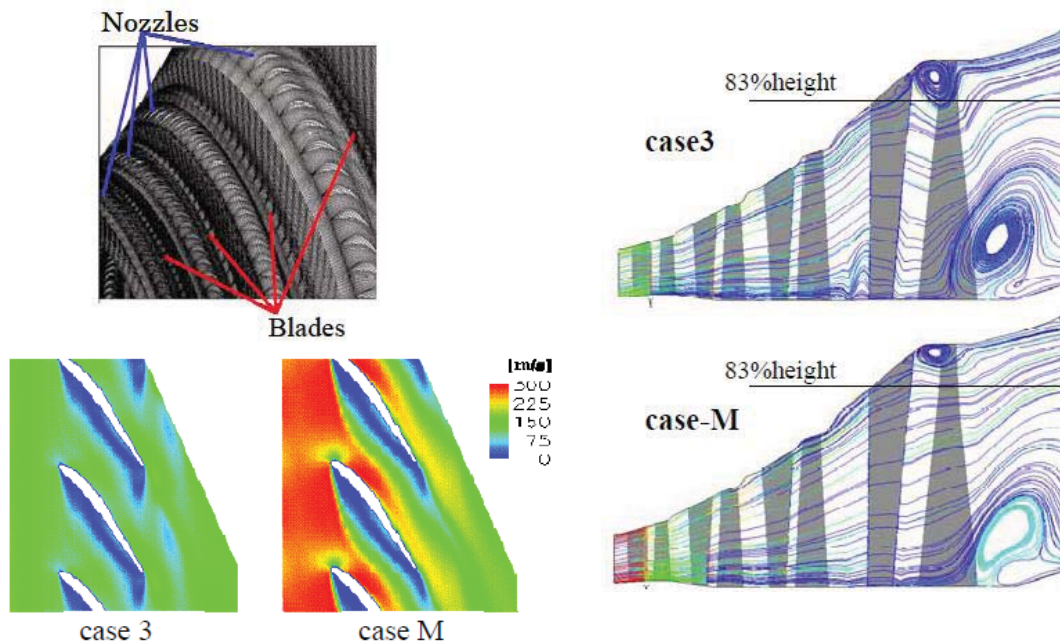
5. 技術課題とCAEの活用:コスト低減 材料仕様の見直し例 (動翼材料の熱処理)



Mechanical Properties of Typical long blade material (PH13-8Mo)

動翼にかかる非定常流体力の予測精度を向上しないと、材料靱性を下げる設計は出来ない。

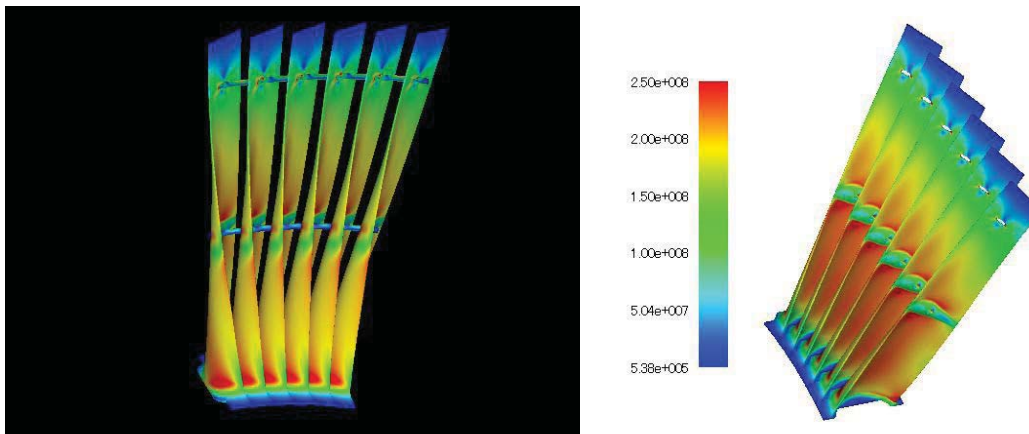
5. 技術課題とCAEの活用:コスト低減 低負荷時の流体解析例:解析格子と定常解析例



Velocity contours at 83% height

定常流体解析にて低負荷時の流体励振力の発生原因を定性的に把握

5. 技術課題とCAEの活用:コスト低減 構造解析実施結果(最終段遠心応力解析例)



厳密な形状モデル化で連結構造周辺の応力分布を詳細に把握

II. これからの「ものづくり設計」におけるCAEの役割と大学

1. 教育:対象システムに必要なCAEを構築、活用できるエンジニアの育成

流体・構造・熱などの力学解析の教育に加えて

- ① 設計学(ライフサイクルコスト設計)
- ② コスト学(コスト分析、コスト予測、コスト評価、コスト設計)
- ③ プロジェクト管理(ものづくり設計のブレークスルーを実現)

2. 研究:新しい価値の創造を支援

- ① コンソーシアムプログラム:各企業共通課題を短期間で解決
- ② 公的資源の活用(HPC設備、研究資金など)
- ③ 研究開発エンジニアの育成支援(受託研究員等)
- ④ 研究開発の場を提供(中小企業支援)