

評価の詳細	
研究開発課題名（研究機関名）： Na冷却高速炉のタービン発電システムに関する研究開発 (国立大学法人東京工業大学)	
研究開発の実施者 機関名：国立大学法人東京工業大学 代表者氏名：有富正憲 機関名：独立行政法人日本原子力研究開発機構 代表者氏名：稲垣嘉之	
研究期間及び予算額：平成19年度～平成21年度（3年計画） 282,335千円 研究開発予算 平成 19 年度 98,036 千円 平成 20 年度 92,419 千円 平成 21 年度 91,880 千円	
項目	内容
1. 目的・目標	Na冷却高速炉のタービン発電システムにおいて、従来の蒸気に換えて超臨界CO ₂ を利用することで、安全性及び経済性に優れた超臨界CO ₂ タービン発電システムを実現するために、これまでのCO ₂ 圧縮機の作動点からは離れた超臨界点近傍で作動するCO ₂ 圧縮機の開発が必要である。このため、超臨界CO ₂ 圧縮機を製作して、超臨界点近傍での性能試験を実施し、性能を評価する。また、翼列・運転制御解析を実施して、実機で使用する圧縮機の概念設計を実施する。更に、超臨界CO ₂ 雰囲気中での構造材料の耐食性を評価することを目的とする。
2. 研究成果 ・ 成果 ・ 副次的な成果 ・ 論文、特許等	【研究開発項目（1）超臨界CO₂圧縮機性能試験】 [得られた成果] 臨界点近傍におけるCO ₂ 圧縮機の性能を明らかにし、安定した運転が可能であることを確認するために、電動機駆動の小型圧縮機モデルを製作し高圧CO ₂ 中試験を実施した。試験機は、実機（200MW規模）の約10,000分の1の出力であるが圧力比は出来る限り模擬（大きく）する必要があるため、実機（3,000rpm）に対して12,000rpm以上の高速回転機にする必要がある。このような高速電動機駆動圧縮機は既存の装置には存在しなかったが、小型化が可能な遠心式インペラとし、インバータ制御の永久磁石内蔵電動機ロータとガス軸受を組み合わせることでシールを省略できる密閉式装置とすることで高速回転、高圧ガスシール及びスラスト支持に伴う難問を解決し、運転圧力3.5～8.2MPa、流量～6kg/s、回転数1,800～17,400rpm、圧力比1.01～1.13の範囲で試験を実施し、下記の成果を得ることができた。このような試験データはほぼ同時期に実施された米国Sandia研究所の試験においても得られたが、生データは公表されておらず、今後、我が国で超臨界CO ₂ ガスタービン発電システムを開発するためには必須の貴重なデータである。 (1) 臨界点（31℃、7.38MPa）近傍を中心とする圧力、温度領域における回転数、質量流量、入口温度、出口温度、入口圧力、出口圧力等多数のデータを取得、分析、評価した結果、CO ₂ 物性値が急変する領域においても、圧縮機の安定した運転が可能であること、臨界点を超える圧力（8MPaレベル）では、理想気体の状態方程式ではほぼ表される通常の物性値領域（3～6MPaの低い圧力）と比べて、小さな仕事（エンタルピー増加）で目標と

する圧力比が得られることを確認した。

- (2) 特性の異なる 3 種類のインペラ（外径 110mm、76mm、56mm）について、臨界点（31℃、7.38MPa）近傍を中心とする圧力、温度領域におけるデータを取得したが、いずれのインペラにおいても同様の結果が得られたことにより、インペラ仕様によらず安定した運転が可能で、かつ高い性能を期待できることが明らかになった。
- (3) 既存の圧縮機設計手法に基づき設計・製作したインペラの試験により期待どおりの性能が得られたことにより、超臨界点近傍の圧縮に対しても既存の圧縮機設計手法が有効であることが示された。
- (4) 数値流体解析（CFD コード CFX）によるインペラ流れの解析を実施した。その結果、解析で物性値を忠実に模擬すれば、圧力比の解析結果と試験結果は良く一致し、臨界点近傍での圧縮機の設計に対しても CFD（Computational Fluid Dynamics）が有効であることが明らかにされた。このことは、実用化に向けた実機のインペラの空力設計を実施する際に、モデル試験に頼らなくともかなりの精度で性能推定が可能であることを示している。
- (5) 超臨界 CO₂ ガスタービンシステムで高い熱効率が得られること、高性能で運転信頼性の高い圧縮機の製作が可能であること、試験結果と従来設計手法を組み合わせることにより、実機圧縮機の設計を精度よく行えることが明らかになった。

【研究開発項目（2）超臨界 CO₂ 機器・システムに関する設計及び解析】

[得られた成果]

2.1 翼列・運転制御解析

翼列解析

超臨界 CO₂ ガスタービンシステムの熱出力 600MWt 発電プラントを構成する軸流形式の高圧圧縮機及びバイパス圧縮機について空力設計を実施した。その結果、効率、翼強度、比速度（Ns）を考慮し、高圧圧縮機については 14 段、バイパス圧縮機については 21 段の翼列を設計点として選択し、これらの翼列について汎用流体解析コード FLUENT による 2 次元 CFD 解析を実施した。

- (1) FLUENT 解析では、動翼入口全圧、全温及び出口静圧を入力値として、解として流量の値が得られる。それ故、多段軸流圧縮機翼列を一度に解析すると、各段の流量が変化してしまう。そこで、多段の翼列解析は 1 段ずつ解析することにより 10 段以上の多段の解析が可能であることを示した。
- (2) CO₂ ガスの物性値としては、理想気体近似モデルと実気体モデルによる解析を実施した。実気体モデルの場合には、既存のコードでは臨界点近傍では、物性値変化が激しいことにより解析は困難であった。そこで、理想気体近似モデル、即ち、分子量を修正することにより密度を実気体の値に一致させる方法を採用した結果、臨界点近傍領域でも解析でき、かつ解析により得られた流量と設計流量が良く一致することから、妥当な解析結果と云える。
- (3) 既存の圧縮機理論およびデータに基づく設計手法が超臨界 CO₂ 圧縮機にも適用可能であることが明らかになった。

運転制御解析

超臨界 CO₂ ガスタービンシステムに特徴的な 2 台に分割した再生熱交換器及びバイパス圧縮機回路を有するシステムの過渡応答計算コンピュータプログラムの基本形を作成し、発電機負荷喪失事象を対象に高圧プレナム

から CO₂ を排出する解析を実施した。解析結果は妥当であり、支配方程式及び解析方法が妥当であることが確認された。これにより、実機の複雑な系統及び制御システムに対する過渡応答解析プログラム作成に関する見通しが得られた。

2.2 実機ターボ機械設計

実機ターボ機械設計では、ガスタービンメーカーへの委託により 1500MWe 高速炉発電プラント用 CO₂ 圧縮機及びタービンの設計を実施した。これにより、断熱効率として十分高い値（タービン：92%、軸流圧縮機：88%）を期待できること、翼強度や軸振動などの機械構造設計上困難な問題は予想されないことが明らかになった。圧縮機については、軸流と遠心の両形式について設計した結果、性能、サイズ、安定性等全ての面で軸流形式が優れているとの結論に達した。以上の結果、高性能で信頼性のある実用規模の超臨界 CO₂ ガスタービンの設計が可能であると結論された。

【研究開発項目（3）超臨界 CO₂ 中における耐食性に関する研究】

[得られた成果]

圧力 20MPa、温度 400～600℃の超臨界 CO₂ 中における耐食性に関する試験を行い、高速炉構造材料候補材（316FR 及び高クロム鋼：12Cr 鋼及び 9Cr 鋼）の 8,000 時間にわたる腐食データを取得・評価し、以下のような成果を得た。

[12Cr 鋼（9Cr 鋼）]

- (1) 12Cr 鋼の鋼表面には、2層構造の酸化皮膜が形成された。この酸化皮膜は、温度が高くなるほど、時間が長くなるほど成長した。また、酸化層直下にはブレイクアウェイ酸化を誘起するといわれている浸炭が観察され、この挙動も同様に高温・長時間になるにつれ進行していることがわかった。しかしながら、金属組織観察や重量変化挙動からは、ブレイクアウェイの発生や酸化皮膜の剥離の様相は観察されなかった。
- (2) 取得した結果に基づき、20MPa 高温超臨界 CO₂ 中における 12Cr 鋼の腐食量（重量増加）の温度・時間依存性について定式化した。得られた酸化速度定数は、既往研究（H15MEXT 公募、10MPa 下試験）から得られた酸化速度定数と同等であり、10MPa から 20MPa の圧力範囲にあたっては、耐食性に及ぼす CO₂ 圧力の影響は観察されないことが確認された。
- (3) 9Cr 鋼の腐食試験結果について、12Cr 鋼の結果と比較した結果、有意な違いは認められず、現評価段階では、12Cr 鋼に対して取得した高温酸化挙動の記述式を適用しても支障がないと考えられた。
- (4) 定式化した重量変化挙動をベースに、12Cr 鋼の減肉量（腐食量）を評価した。その結果、年間の減肉量は 50 μm と評価された。

[316FR]

- (1) 316FR の鋼表面には部分的にノジュール状の酸化物が観察される程度の良い耐食性を示した。CO₂ 接液面近傍には、12Cr 鋼と同様に浸炭が観察されたが、その程度は十分に小さかった。
- (2) 重量変化（増加）挙動には、温度・浸漬時間依存性は明瞭には観察されなかった。これは、その酸化形態がノジュール状の状態を継続しているためと思われる。なお、重量変化量の最大値を示した 600℃-8,010 時間浸漬材においても、重量増加はたかだか約 6.2g/m² であった。

この実験結果を踏まえ、同鋼の年間減肉量（腐食量）を 10g/m² と見積もった。この値を、12Cr で得られた重量変化と減肉量の関係に適用する

と、年間減肉量は4 μ mに相当する。

【事業全体】を通して

東工大で実施した超臨界 CO₂ ガスタービンに関する研究では、①臨界圧力をまたぐ 3.5~8.2MPa の圧力で圧縮機モデルの試験を実施し、物性値変化の急激な臨界点近傍においても安定運転が可能で、超臨界圧では圧縮仕事が低減され、性能についても既存の圧縮機なみの高い値を期待できることが明らかになった。更に汎用コード CFX による解析が十分有効であることを示した。②汎用コード FLUENT による軸流圧縮機翼列解析により、1段ごとに解析する方法で 14 段や 21 段の多段翼列解析が可能であり、また臨界点近傍においても密度を模擬した理想気体近似により解析が可能であることを示した。③超臨界 CO₂ ガスタービン発電システムの過渡運転状態に対するコンピュータ解析の基本形を作成した。④メーカー委託の実機設計により、超臨界 CO₂ ガスタービンのタービン及び圧縮機は、十分高い性能を達成できることを示した。

原子力機構で実施した超臨界 CO₂ 中腐食試験では、高速炉候補材である 316FR では殆ど腐食が認められず、12Cr 鋼 (9Cr 鋼) では腐食が認められるものの実用に耐える量 (60 年間で 0.4mm と推定) であることが明らかになった。更にプラント設計に必要な不可欠な腐食評価式案を提案した。

【論文、特許等】

報道

- ・2010 年 2 月： 文科省記者クラブ、文科省科学記者会、“Na 冷却高速炉のタービン発電システムに関する研究開発”

論文発表

(ジャーナル)

- ・2010 年 2 月： JSME Journal of Power and Energy Systems, Vol. 4, No. 1, “Design and Analysis of an Axial Bypass Compressor Blade in a Supercritical CO₂ Gas Turbine” (T. Ishizuka, Y. Muto, M. Aritomi, N. tsuzuki, H. Kikura)
- ・2010 年 2 月： JSME Journal of Power and Energy Systems, Vol. 4, No. 1, “Corrosion Behavior of FBR Structural Materials in High Temperature Supercritical Carbon Dioxide” (T. Furukawa, Y. Inagaki, M. Aritomi)

(国際会議)

- ・2008 年 5 月： ICONE16-48335(16th International Conference on Nuclear Engineering), “Design and Test Plan of the Supercritical CO₂ Compressor Test Loop” (T. Ishizuka, Y. Muto, M. Aritomi)
- ・2008 年 6 月： ICAPP’08-8131 (2008 International Congress on Advanced in Nuclear Plants), “Design of Small Centrifugal Compressor Test Model for a Supercritical CO₂ Compressor in the Fast Reactor Power Plant” (Y. Muto, T. Ishizuka, M. Aritomi)
- ・2009 年 5 月： ICAPP’09-9077 (2009 International Congress on Advanced in Nuclear Plants), “Design, Fabrication, and Test Plan of a Small Centrifugal Compressor Test Model for a Supercritical CO₂ Compressor in the Fast Reactor Power Plant” (Y. Muto, T. Ishizuka, M. Aritomi)
- ・2009 年 7 月： ICONE17-75136(17th International Conference on Nuclear Engineering), “Design and Analysis of the Axial Bypass

	<p>Compressor Blade of the Supercritical CO₂ Gas Turbine” (T. Ishizuka, Y. Muto, M. Aritomi, N. Tsuzuki, H. Kikura)</p> <ul style="list-style-type: none"> • 2009年7月: ICONE17-75121(17th International Conference on Nuclear Engineering), “Corrosion Behavior of FBR Structural Materials in High Temperature Supercritical CO₂” (T. Furukawa, Y. Inagaki, M. Aritomi) • 2010年5月: ICONE18-29371(18th International Conference on Nuclear Engineering), “Performance Test Results of the Supercritical CO₂ Compressor for a New Gas Turbine Generating System” (M. Aritomi, T. Ishizuka, Y. Muto, N. Tsuzuki) • 2010年6月: ICAPP’10-10102(2009 International Congress on Advanced in Nuclear Plants), “Conceptual Design of a Commercial Supercritical CO₂ Gas Turbine for the Fast Reactor Power Plant” (Y. Muto, T. Ishizuka, M. Aritomi) <p>口頭発表</p> <ul style="list-style-type: none"> • 2009年3月: 日本原子力学会 2009年春の年会 J14” 高速炉発電システム用超臨界 CO₂ 圧縮機の開発 (1) 小型遠心圧縮機試験体の構造と性能” (武藤、石塚、有富) • 2009年3月: 日本原子力学会 2009年春の年会 J15” 高速炉発電システム用超臨界 CO₂ 圧縮機の開発 (2) 試験装置と運転範囲 (石塚、武藤、有富) • 2009年3月: 日本原子力学会 2009年春の年会” 超臨界 CO₂ 中における高速炉構造材料候補材の腐食挙動” (古川、稲垣、有富) • 2010年3月: 日本原子力学会 2010年春の年会” 超臨界 CO₂ 中における高速炉構造材料候補材の腐食挙動(2)” (古川、稲垣、有富)
<p>3. 事後評価</p> <ul style="list-style-type: none"> • 研究開発の進捗 • 研究開発の成果 • ブレイクスルー 	<p>【研究開発の進捗】 超臨界CO₂圧縮機性能や機器・システムに関する設計、耐食性の把握等、研究開発は計画通り遂行したと評価できる。</p> <p>【研究開発の成果】 超臨界CO₂圧縮機性能や機器・システムに関する設計、耐食性の把握等、想定通りの成果が得られたと評価できる。特に、小型圧縮機モデルを使った試験では、臨界点近傍のCO₂圧縮機の性能を明らかにする有用な試験データが得られている。</p> <p>【ブレイクスルー】 CO₂ガスタービンシステムは、ナトリウム冷却高速増殖炉の安全性向上が期待できる技術である。本システムの試設計が、ある程度の定量性を持って実施されており、ブレイクスルーに向けた基盤技術が得られたと評価できる。 CO₂ガスタービンシステムでは、CO₂物性値が急変する領域においても圧縮機の安定運転が可能であることが示されており、経済性の向上に有効な発電効率改善に寄与する技術の貴重な国内データが蓄積できた。</p>
<p>4. その他</p>	<p>超臨界ガスタービンは、多様な用途に適用できる技術であり、我が国が世界をリードしている。他分野への適用も視野に入れて着実に研究を進めていただきたい。</p>