

平成 22 年 2 月 19 日

東京工業大学広報センター長

大 倉 一 郎

安全性と低コスト両立した次世代高速増殖炉用発電技術にめど

— 超臨界二酸化炭素ガスタービンの基幹技術・ターボ圧縮機の安定運転と性能を確認 —

東京工業大学原子炉工学研究所の有富正憲所長らの研究グループは、ナトリウム冷却高速増殖炉（FBR、用語 2）からの熱を超臨界状態の二酸化炭素（用語 1）に伝え、高効率で発電する超臨界二酸化炭素ガスタービン発電の実現にめどをつけた。同発電システムの基幹技術であるターボ圧縮機の二酸化炭素臨界点近傍における安定運転と運転性能の確認に成功したものの。

FBR の次期実証炉では蒸気タービンによる発電が想定されているが、ナトリウム・水反応（用語 3）の危険性を回避する対策が必要なため、経済性を飛躍的に向上させるのは難しい。そこでナトリウム・水反応のような激しい反応を生じず、かつ高い発電効率を達成できる超臨界二酸化炭素ガスタービン発電が安全性・経済性を両立する FBR として世界的に注目されている。

今回、実用化に向けて残された最後の課題である二酸化炭素の物性値が急激に変化する超臨界点近傍での圧縮機の運転安定性と運転性能の確認を行うため、小型遠心圧縮機モデル試験を文部科学省の「原子力システム研究開発事業」の受託事業として実施している。その結果、圧縮機は安定に運転できること、臨界点近傍では他領域に比べて著しく小さな動力で圧縮できることを確認した。これにより、実用化に向けた課題がすべて解決、今後、実用化に向けて世界初となる超臨界炭酸ガスタービンシステムの運転制御技術の確立を目指した発電原理実証試験を行っていく。

● 研究の背景

FBR 原型炉では冷却材に金属ナトリウムを使い、水と熱交換して蒸気タービンで発電する。次期実証炉でも蒸気タービンによる発電が想定されている。しかしナトリウム・水反応に安全に対処するため、原子炉 1 次系ナトリウムと蒸気タービン系統との間に中間ナトリウム系統を設け、あるいは二重構造伝熱管の蒸気発生器の開発など安全性に万全を期すためのさまざまな対策が考えられている。

一方で、実用化段階で期待される FBR の建設コストは現状に対して大幅なコストダウンが要求されており、現行の蒸気発電システムでは安全性を十分に確保したうえで、経済性を飛躍的に向上させるのは極めて難しい。これを解決する技術として超臨界二酸化炭素を熱交換流体とする発電システムの研究が進んでいる。

超臨界二酸化炭素ガスタービン発電はできるだけ高い温度でタービンを動かして高効率を達成す

る従来型のガスタービン発電技術とは異なり、発電において必要とされる圧縮機仕事を低減させることにより低い運転温度でも高い発電効率を実現しようとするもの。500℃程度の中温度領域で十分に高い発電効率を得られ、かつガスタービンがコンパクトになり設備費も削減されることから FBR 用発電システムとして最適なものである。

国際的にもこの発電形態は次世代炉のひとつとして取り上げられ (Generation IV、用語 7)、現在、日本、米国、フランス、韓国で試験研究がなされている。

●これまでの研究

同研究グループはこれまで日本原子力研究開発機構と協力して基礎技術の研究開発を進め、①ナトリウム・二酸化炭素反応試験において、同反応は低温では生じず、高温では生じるが、固体の反応生成物により反応が速やかに停止することを確認②超臨界二酸化炭素雰囲気下での腐食試験を実施し、FBR ならびにガスタービン構造用ステンレス鋼の耐食性に問題のないことを実証③同ガスタービンシステムの性能を大きく左右する再生熱交換器において耐圧性の優れた新しいコンパクト高性能再生熱交換器 (用語 4) を開発—など同ガスタービンシステムの実用化に向けての懸念事項を一つひとつ着実に解決してきた。

今回は二酸化炭素の物性値が急激に変化する超臨界点 (31℃、7.38MPa) 近傍での圧縮機運転における安定性と圧縮機自身の運転性能の確認を行い、小型遠心圧縮機モデル試験を実施し、実用化に向けて残された最後の課題を解決した。

●今回の研究内容

超臨界二酸化炭素ガスタービン発電システム (図 1 参照) は、超臨界点近傍での気体分子間力の特異性により圧縮仕事が軽減されることに着目した新しい高効率閉サイクルガスタービン発電システムである。圧縮仕事は同じ閉サイクルヘリウムガスタービンに比べると半減される。閉サイクルガスタービンサイクルの有効仕事はタービン仕事から圧縮機仕事を差し引いたものであり、有効仕事と熱入力の比がサイクル熱効率であるから、同一タービン入口ガス温度で比較すると (図 2 参照)、5%程度高いサイクル熱効率を得られる。開放ランキンサイクルである蒸気タービンと比較すると、圧縮仕事は大きいピンチポイントが無く熱の有効利用が図れることから同一タービン入口温度では同程度の熱効率となる。

ガスタービンの寸法について比較すると、蒸気タービンは 10 メガパスカル (MPa) 程度の入口圧力から 0.005MPa の出口圧力まで蒸気を膨張させる、すなわち約 2000 倍に膨張させるために出口寸法は巨大になる。一方、超臨界二酸化炭素ガスタービンの膨張比は約 2.5 であるのでタービン寸法は格段に小さい (図 3 参照)。

またシステム構成でも、蒸気タービンは多数段の給水加熱や脱気器などを必要とするのに比べて、新たに必要な機器は再生熱交換器のみであり、シンプルである。そのため大幅な容積低減、したがって設備費節約を期待できる。ナトリウム冷却 FBR に適用した場合の建屋の比較を図 4 に示す。タービン建屋の容積は 60%まで大幅に低減される。

タービン作動媒体である二酸化炭素は大気的主要構成気体の一つであり、大気圧下で、温度 650℃までは化学的に非常に安定で、毒性も無く、金属材料を腐食させにくい点でも優れている。系統外へ

漏洩しても、火災や人的障害の可能性は無い。もちろん資源問題も無い。この点、高温ガス炉に使用される天然ガス中にごく少量含まれるヘリウムガスと比べると資源の観点からの経済性に優れている。ナトリウム冷却 FBR への適用を考えると、水・蒸気がナトリウムと反応して可燃性水素を生成するのに対して、二酸化炭素はナトリウムと現在の定格運転温度 550°C までの温度領域では事実上ほとんど反応しない大きな利点がある。

二酸化炭素は非常に高温では一酸化炭素と酸素に解離するが、650°C 以下ではほとんど無視できる。それゆえ超臨界二酸化炭素ガスタービンは 500~650°C の中温領域で優れた発電システムであるといえ、具体的適用先としては、ナトリウム冷却 FRB のほか高温ガス炉（用語 5）、核融合炉（用語 6）の発電用として期待できる。核融合炉への適用を考えてもトリチウムは水と簡単には分離できないのに対して、二酸化炭素との分離は容易であるので大きな利点がある。

● 研究の今後の展開

超臨界二酸化炭素ガスタービン発電システムは 500~600°C の温度領域では熱効率が高く、二酸化炭素が化学的に安定であることとあいまって、原子力発電システム（特にウラン資源有効利用の中核をなす液体金属冷却 FBR の）として世界的に注目を集めている。同研究グループは早くからこのサイクルの将来性に着目して、米国マサチューセッツ工科大学（MIT）と同時期に研究に着手し、これまでに特にサイクルの熱効率を支配する高温高压コンパクト再生熱交換器の開発において世界をリードする成果を上げてきた。もう一つの最重要機器である臨界点近傍におけるターボ圧縮機性能についても、米国サンディア（Sandia）研究所より半年遅れながら試験研究を実施したものの成功裏に終了し、超臨界点圧力近傍における不安定性は生ぜず安定に運転制御できることが明らかとなった。

これらの成果を背景に、実用化に向けての最後の仕上げというべき全体システムの運転制御試験開始の準備段階に入った。米国や韓国においても全体システムの試験装置製作が計画されており、時期を逸することなく全体システムの運転制御試験を実施し、次いで、超臨界二酸化炭素ガスタービン発電システムを接続した形での原子炉システム発電性能試験や、実規模による性能確認試験につなげたいと考えている。

● 研究の波及効果

ナトリウム冷却高速炉の課題は、ナトリウム・水反応による可燃性水素の発生、軽水炉に比べて発電コストが高いことであるから、これらの課題解決に寄与することは、我が国の核燃料サイクルが、国民に歓迎される、より安全で、より経済性の高いものなることを意味している。また、地球温暖化対策や環境汚染問題を考える場合、このことは極めて重要である。

超臨界二酸化炭素ガスタービン発電システムは、天然ガス燃焼火力発電、地熱発電、太陽光発電、高温ガス炉、核融合炉においても有効に活用される可能性が高く、これらの分野における貢献も期待される。本発電システムの構成機器である PCHE 型熱交換器は高温高压に耐えるコンパクトな唯一ともいえる熱交換器形式であり、さまざまな産業分野への応用による高度化が期待できる。

超臨界流体は通常の流体と異なる特性を有することから、近年、多方面の用途が開発されつつある。二酸化炭素の場合、抽出能力に優れていることから、食品や医薬品の製造において威力を発揮できる。水は反応性が極めて高いことから、PCB の分解などに利用されているのは良く知られている。これら

の設備においては、流体を超臨界状態にし、輸送する圧縮機が不可欠である。小規模の場合、往復動式（容量式）圧縮機が用いられるケースが多いが、効率、流れの安定性（脈動が無い）、潤滑油混入問題等においてターボ圧縮機の方が優れている。そのため安価で高性能なターボ圧縮機が開発されれば、多くの用途が開けると期待できる。

また本研究で取り扱う臨界点近傍でのターボ圧縮機の開発においては、今までほとんど行われたことの無い臨界点近傍の流体の CFD (Computation Fluid Dynamics) 解析を実施するが、上記の抽出や分解プロセスの理論的解明には、超臨界流体の熱・流動解析が不可欠であり、本研究の成果は、この面においても大いに役立つことものと期待される。

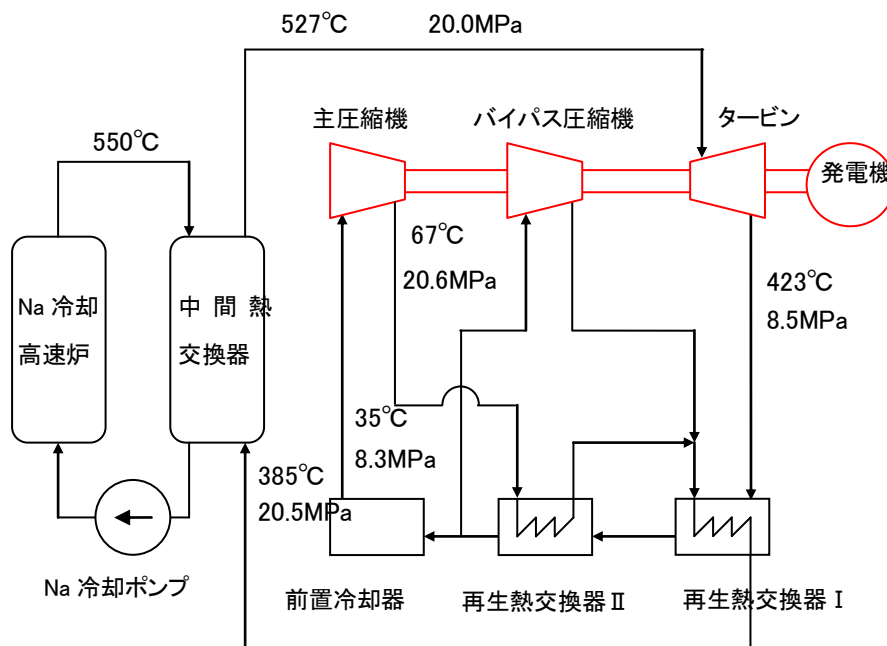


図1 超臨界 CO₂ ガスタービン発電システム（高速炉へ適用の場合）（熱効率 43%）

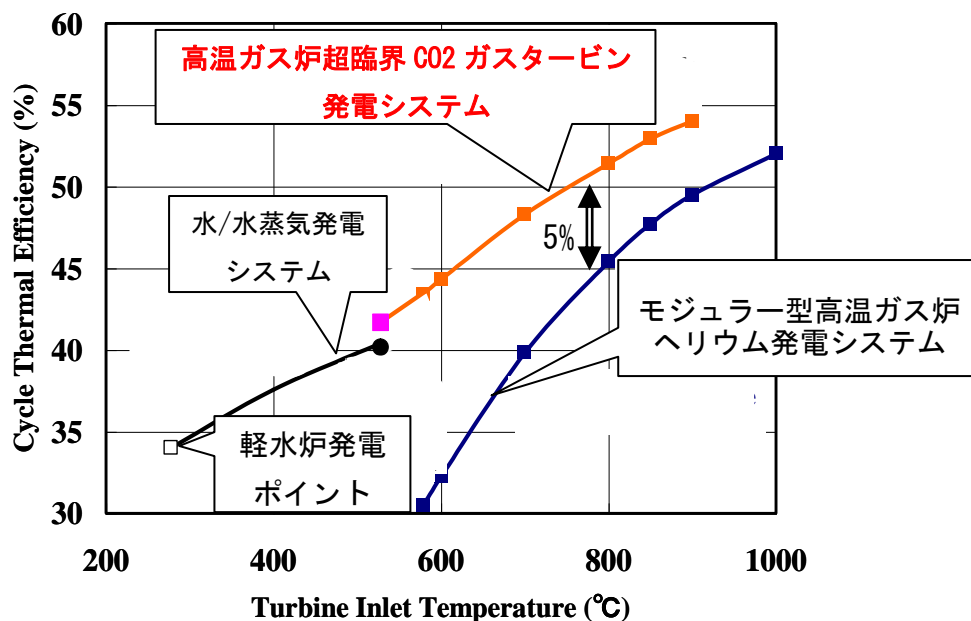


図2 超臨界 CO₂ ガスタービンと He タービン (HTGR)、蒸気タービンとのサイクル熱効率の比較

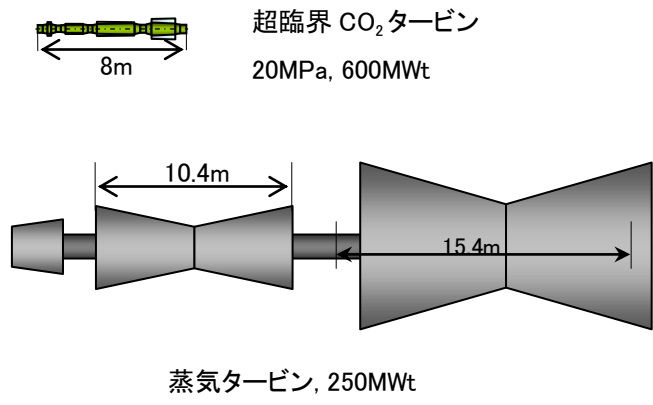


図 3 超臨界 CO₂ タービンと蒸気タービンの寸法比較

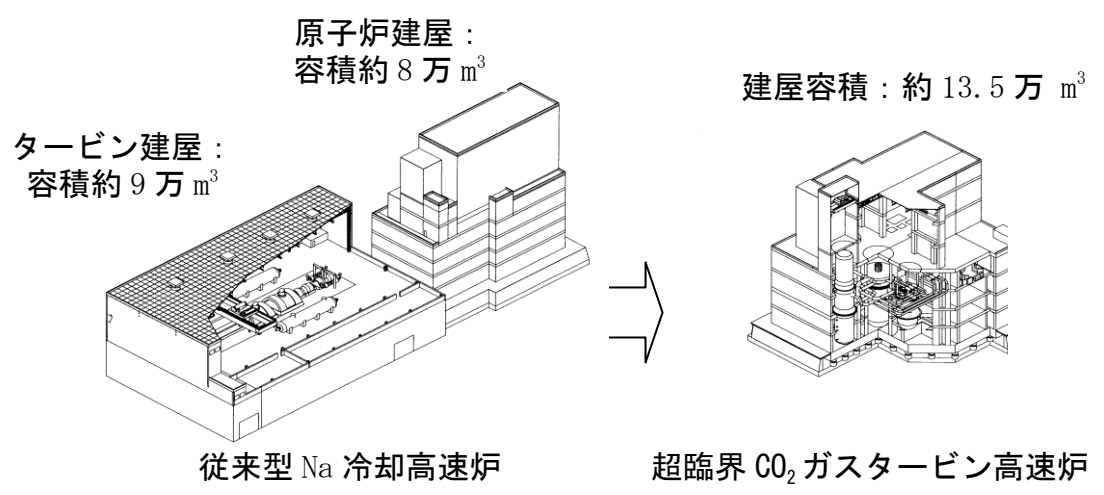


図 4 超臨界 CO₂ タービンによる建屋容積低減

参考資料

▲ナトリウム冷却 FBR への適用

ナトリウム冷却 FBR の課題は、ナトリウム・水反応による可燃性水素の発生、軽水炉に比べて発電コストが高いことである。二酸化炭素は高温（例えば 600℃）ではナトリウムと反応するものの反応生成物は固体であることから、基本的には大きな問題とはなり得ない。蒸気タービンを超臨界二酸化炭素ガスタービンに置換することにより、2 次ナトリウムループ削除の可能性もあり、ガスタービン自体シンプルでコンパクトであることから、大幅なコスト削減を期待できる。それゆえ、わが国の FBR 計画の主要概念（ナトリウム冷却炉＋蒸気タービン）を補完する代替概念として、また将来の高性能・合理化概念としての意義は大きい。

▲高温ガス炉への適用

高温ガス炉の課題は、平均出口温度 850℃、局所的には 1000℃近い高温運転を、ヘリウムガスを用いて行うため、高価な耐熱合金の利用や炉心の大型化により経済性や、燃料温度が 1200℃に達するためにセシウム (Cs)-137 や銀 (Ag)-110m といった放射性物質が拡散でヘリウムガス中に放出され、これらがタービンや熱交換器に沈着することにより保守が困難になることである。超臨界二酸化炭素ガスタービンでは 650℃で 850℃のヘリウムガスタービンに比べてやや低い程度の高い熱効率が得られることから、普通の耐熱鋼利用による建設コストの削減や放射性核分裂生成物 (FP) 放出の排除や間接サイクルの採用により、この問題を根本的に解決することが可能である。

▲核融合炉への適用

トカマク型核融合炉における課題は、高温ガス炉同様建設コストの削減、安全性の確保ならびに炉内に保持される放射性物質トリチウムの取り扱いである。炉冷却材として蒸気タービンを採用すると、拡散で水・蒸気に混入するトリチウムの分離が極めて困難となるとともに、水漏洩によりトリチウム増殖材との爆発的反応などが懸念される。中温度領域で運転できる超臨界二酸化炭素ガスタービンではこれらの問題が無く、熱効率、資本費の点でも蒸気タービンよりも優れていることから、期待は大きい。

● **本研究で得られた結果・知見**

超臨界二酸化炭素ガスタービンの実用化に向けた基本的研究課題は以下の 4 項目であったが、今年度までの研究成果により①～④の課題すべてを解消することができた。

- ① コンパクト再生熱交換器の性能及び健全性
- ② 超臨界二酸化炭素と熔融ナトリウムとの反応性確認
- ③ 超臨界点近傍で作動する圧縮機の性能及び健全性
- ④ 超臨界二酸化炭素ガス雰囲気中での材料の健全性

① コンパクト再生熱交換器の性能及び健全性

近年、エッチングや拡散溶接技術の進歩の結果、PCHE (Printed Circuit Heat Exchanger) と名付

けられる新しいコンパクト熱交換器が登場している。これは、金属平板表面にエッチングで微細な流路チャンネル（幅×高さ；数 mm）を加工した後、平板を多数枚重ねて拡散溶接で接合し、熱交換器とするもので、従来のものと比べると、超微細流路の加工が可能で耐圧性に優れる長所がある。それ故、超臨界二酸化炭素ガスタービン発電システムの熱交換器として最適である。東工大では、1999年より研究開発に着手し、実験及び数値流体解析による研究を行った結果、図5に示すようなS字型フィン流路が優れた特性を有することを見出した。即ち、図6に示すように英国 HEATRIC 社製の PCHE（ジグザグモデル）よりも伝熱特性は高く維持したまま圧力損失を1/6に低減できる。また、主としてナトリウム冷却FBRの2次冷却系への適用（図1の中間熱交換器）を目的として、システム及びターボ機械、熱交換器の設計研究を行い、達成可能な熱効率、タービン、圧縮機、ナトリウム・二酸化炭素コンパクト熱交換器の性能を明らかにしてきた。

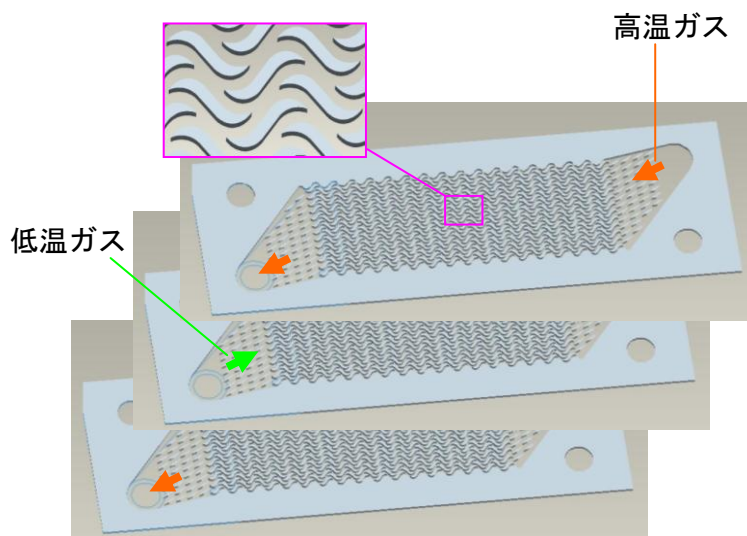


図5 S字フィン流路のPCHE熱交換器の概念図

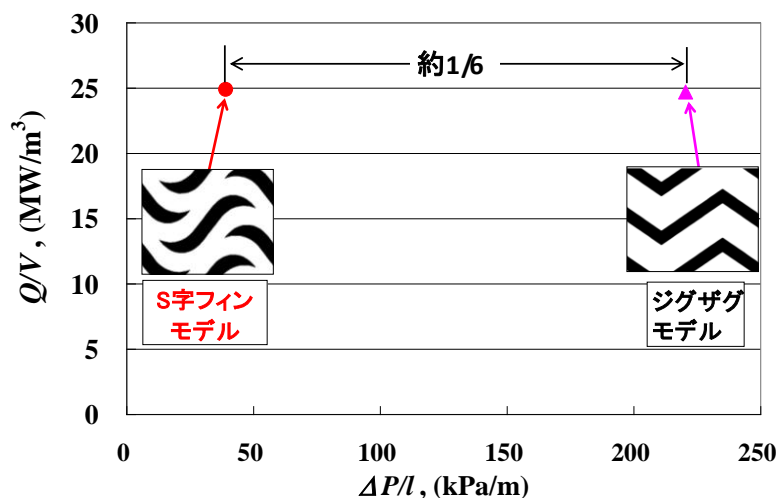
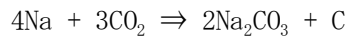


図6 開発した新型PCHEと従来のPCHEとの性能比較

②超臨界二酸化炭素と金属ナトリウムとの反応性確認

①のコンパクト熱交換器を図1の超臨界二酸化炭素・ナトリウム中間熱交換器に採用した場合、考えられる事故事象として、超臨界圧二酸化炭素が図1のフィンプレートからの亀裂などから常圧側の熔融ナトリウム流路チャンネルに流入した場合の下記化学反応などによる熱交換器性能擾乱が考えられる。



本反応は発熱反応ではあるが 300～500℃の熔融ナトリウム中への二酸化炭素ガスの注入試験では、ナトリウム・水反応のような激しい反応は生じず、さらに二酸化炭素ガス温度が250℃以下の場合上記反応は起こらないことが分かった。一方、20MPaの超臨界状態の二酸化炭素がフィンプレート亀裂部から常圧熔融ナトリウム側の狭隘な流路チャンネル（幅×高さ；数mm）に噴き出した場合、急激な断熱膨張が生じるため二酸化炭素はドライアイス温度程度まで急冷され、その段階では上記の理由により金属ナトリウムと反応しないまま流路チャンネルからナトリウムを排斥する。その後、熱交換器全体からの伝熱により低温二酸化炭素が再び加熱されやがてナトリウムとの反応温度に達した段階で反応生成物が狭隘な流路内に生成することにより、このチャンネルを完全に塞ぐ形となり、その段階でナトリウムとの反応が収束してしまう。

③超臨界点近傍で作動する圧縮機の性能及び健全性

実用上大きな問題とされた臨界点近傍での圧縮機運転性能の不安定性について、超臨界二酸化炭素圧縮機小型モデルを試作し、運転試験を行うことによりその安定性に関する検証試験を実施した。

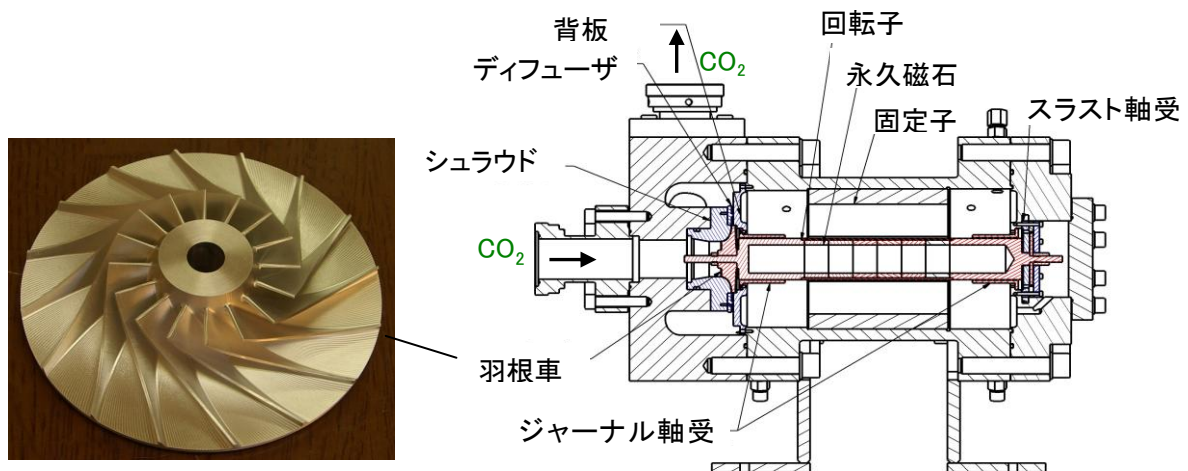
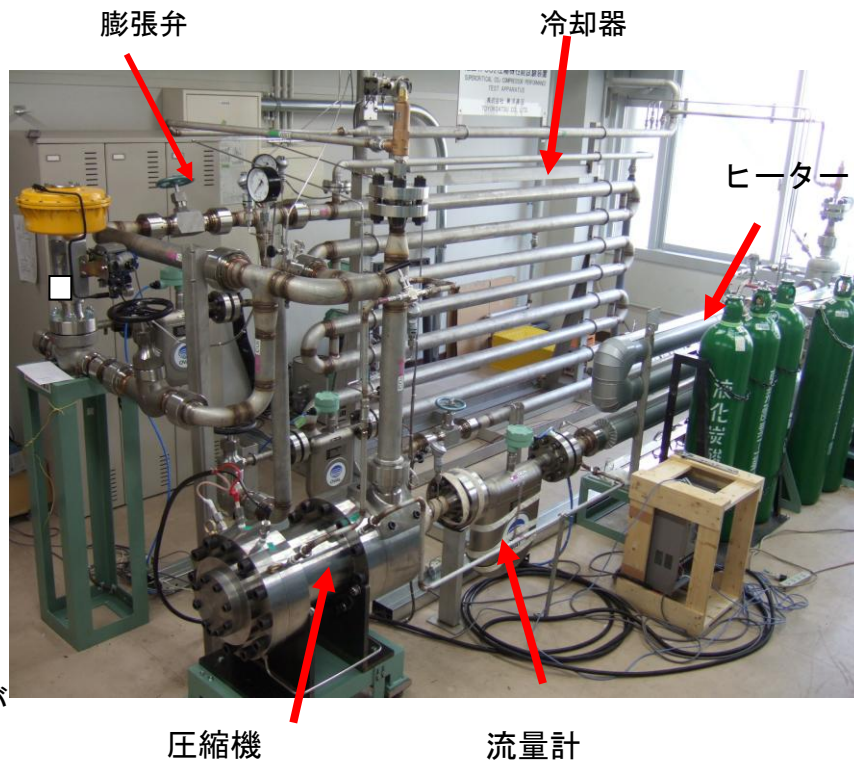


図7 超臨界CO₂遠心圧縮機試験体断面図

上記の圧縮機及び写真の羽根車は、(株)ア-カイブワークスが受注・設計・製作して、納入したものです。



右の写真の圧縮機は、(株)ア-カイクワークスが設計製作を受注し、納入したものです。

図8 圧縮機性能試験装置の外観

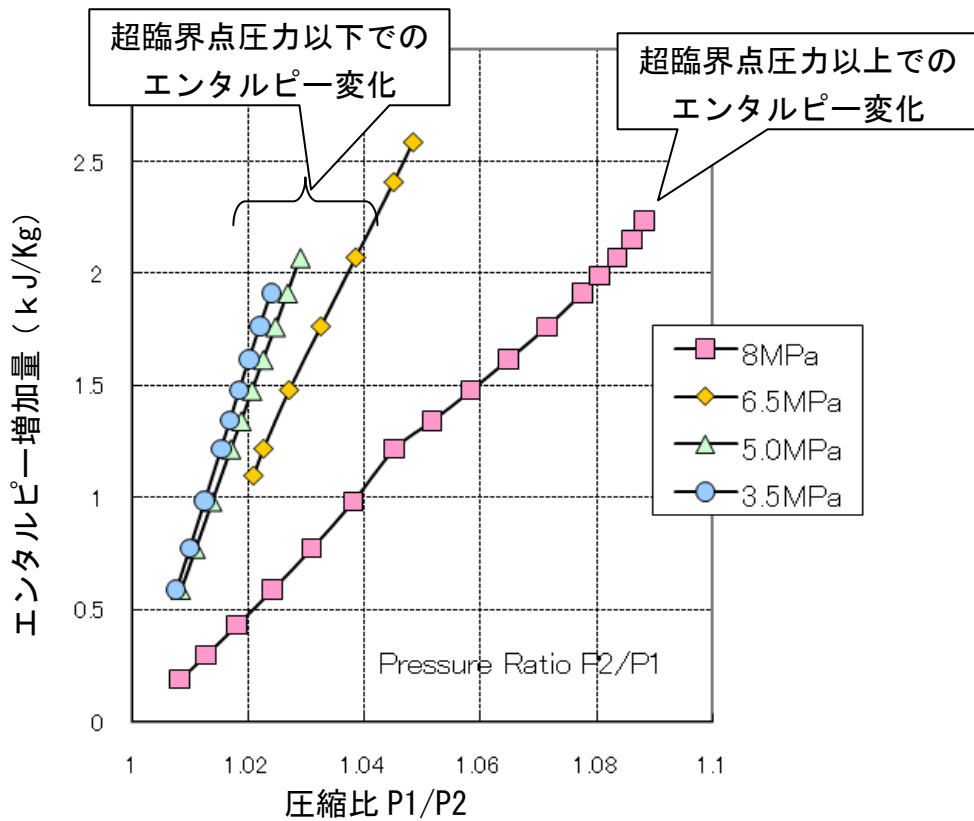


図9 超臨界 CO₂ 遠心圧縮機モデルの性能試験データ

図9に圧縮機により圧力を超臨界点圧力(7.2MPa)近傍で一定に保ったまま圧縮比を徐々に増加させた場合のエンタルピー変化を示す。これによると、臨界点圧力以下(3.5~6.5MPa)に比べて臨界点圧力以上(8MPa)の場合、同じ圧縮比を達成する際に必要とされる仕事量が大幅に低減される(エンタルピー増加量が小さい)ことが確認された。

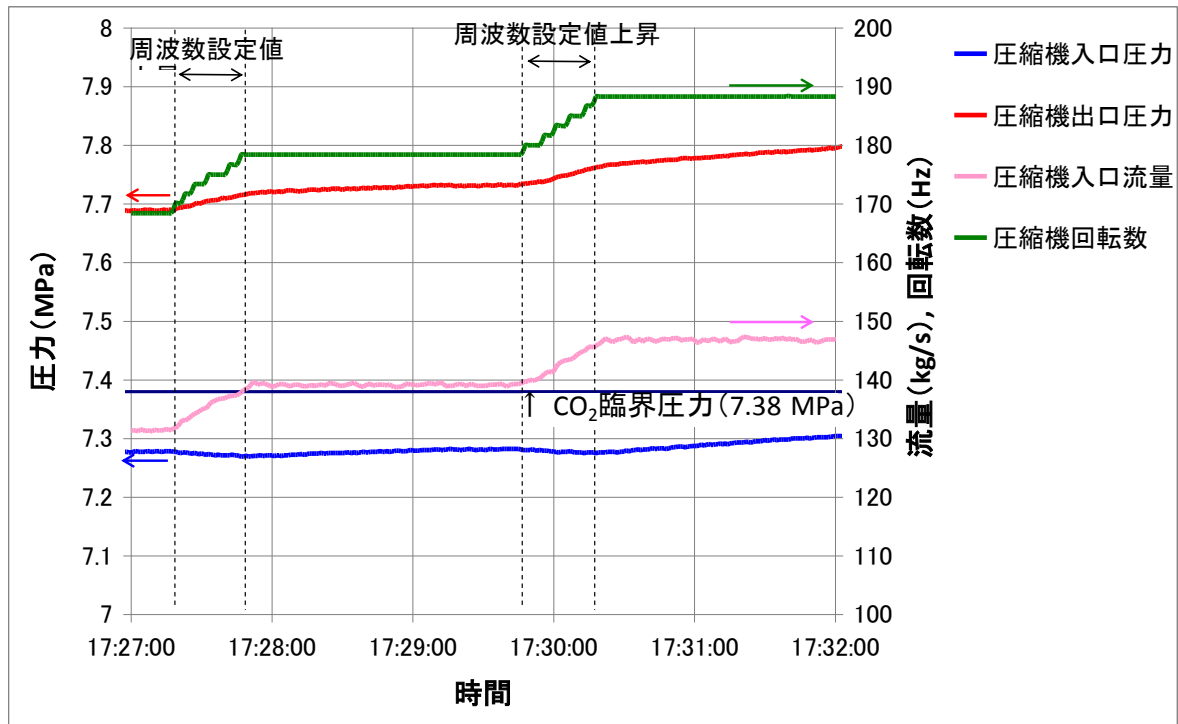


図10 超臨界点上下近傍での圧縮機の連続運転データ

図10に圧縮機により超臨界点圧力(7.2MPa)以下の二酸化炭素を連続的に昇圧し、臨界点圧力を越えて臨界点圧力に至った際の圧縮機入口・出口圧力変化を示す。これによると、圧縮機入口において臨界点圧力以下の二酸化炭素が圧縮機により昇圧され、出口圧力において臨界点圧力を越えてからも一定圧力を維持しており、圧縮機出口圧力に特段の不安定性も認められない。このことから、超臨界点圧力近傍の不安定領域において圧縮機運転性能の安定性を損なう事象が発生せず、圧縮機を安定に運転制御できることが明らかとなった。

④超臨界二酸化炭素ガス雰囲気中での材料の健全性

超臨界においては、通常のとおり温度、圧力とはガスの化学的活性が異なってくることから、超臨界二酸化炭素雰囲気中で金属材料が想定する寿命期間中、健全性を保てるかどうかを試験により確認しておくことが重要であり、図11に示す装置を用いて、12Cr鋼と316FR鋼の2種類の高速度炉の候補構造材料で最大圧力20MPa、最高温度600℃の耐食性試験を実施中である。これまでの試験結果では、316FR鋼については部分的に酸化が観察される程度であり、良好な耐食性を示すことが確認されている。また、12Cr鋼については、CO₂による酸化が進行しやすいものの、その挙動は長時間にわたって安定に推移する傾向にあることが確認されている。

W: Water bath	BT: Buffer tank	DP: Dew-point hygrometer
PH: Pre heater	FM: Flow meter	DPG: Differential pressure gauge
RP: Rotary pump	O ₂ : Oxygen analyzer	

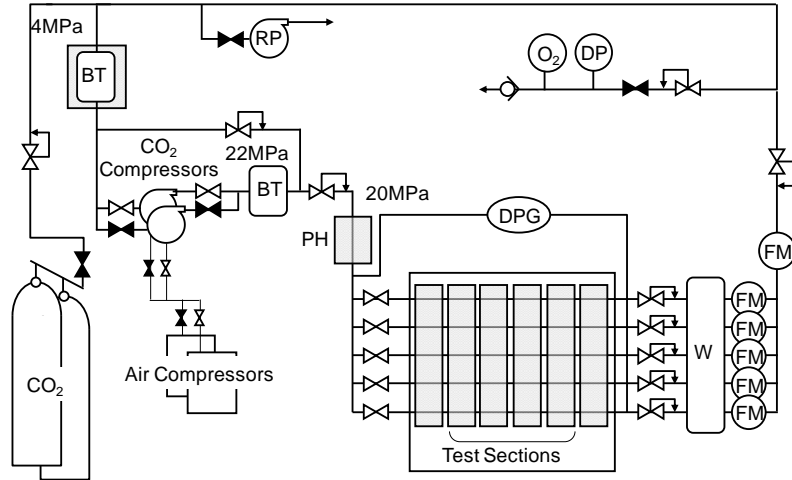


図 11 超臨界 CO₂ 中材料腐食試験装置構成概略図

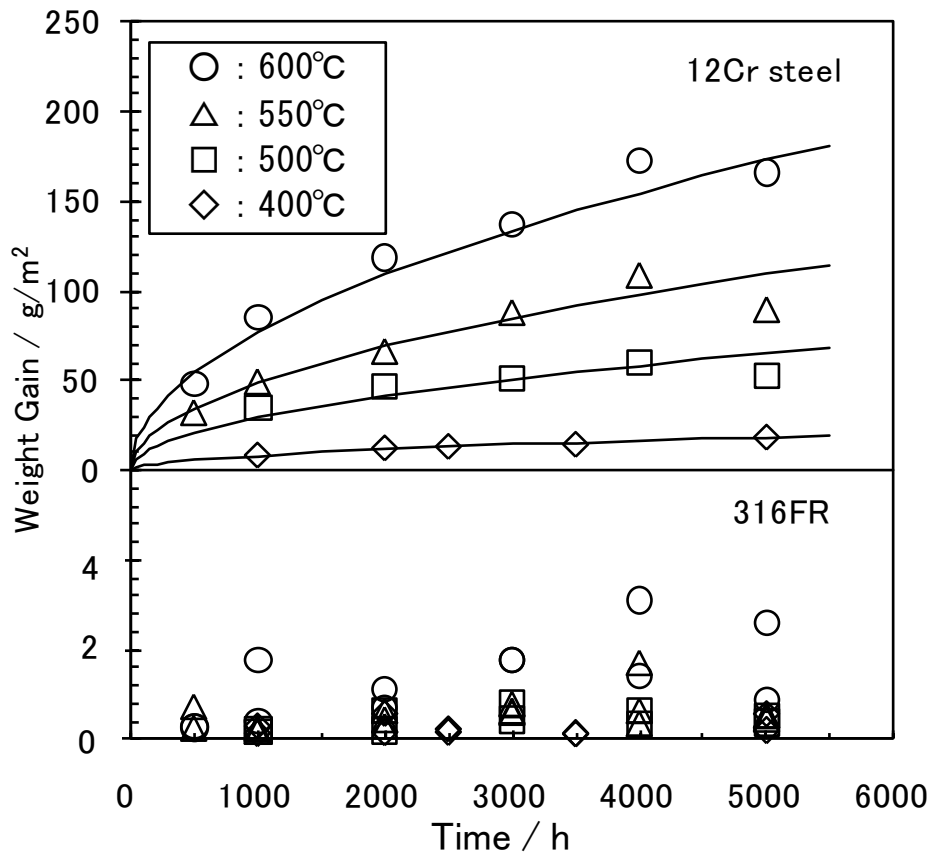


図 12 材料試験片の腐食量（重量変化）測定結果

【用語解説】

1. 超臨界二酸化炭素

温度と圧力の関係において気体と固体との三重点以上（温度 31°C、圧力 7.38MPa）の状態、気体の拡散性と液体の特性を併せ持つ高密度物質である。超臨界二酸化炭素は様々な物質をよく溶解することからコーヒーの脱カフェインなどに使用される。

2. ナトリウム冷却高速増殖炉（FBR）

熔融ナトリウムで原子炉を冷却する方式の高速増殖炉であり、原子炉で燃えてなくなるウラン 235 燃料よりも、より多くの量の新しいプルトニウム燃料をウラン 238 から原子炉を運転しながら作りだす、いわゆる増殖が可能な原子炉である。

3. ナトリウム-水反応

ナトリウムは 98°C で熔融し、非常に反応性の高い金属で、酸、塩基、水と激しく反応する。水と反応して水素を発生しながら水酸化ナトリウムになる。一方で、熱伝導率が高く、高温でも液体で存在するため高速増殖炉の冷却材として用いられている。

4. 再生熱交換器

排熱からの熱回収を行う目的で使用する熱交換器で、小型からモジュール型など幅広い熱機関などに使用されている。超臨界二酸化炭素ガスタービン発電システムにおいてはタービン出口ガスから熱を効率よく中間熱交換器への戻りガスへ輸送するためのもので、発電効率を大きく左右する重要な機器である。

5. 高温ガス炉

原子炉内をヘリウムガスで冷却しながら 600°C 以上の高い温度で運転できる原子炉であり、固有にして受動的な安全性を本質的に備えており、炉心熔融のような大事故が起こる恐れのない原子炉である。

6. 核融合炉

重い原子であるウランやプルトニウムの原子核分裂反応を使った核分裂炉に対して、軽い原子である水素燃料を用いて核融合反応を生じさせることによりエネルギーを取り出す炉型です。現在、日本を含む各国が協力して国際熱核融合実験炉 ITER のフランスでの建設に向けた関連技術の開発がすすめられている。

7. Generation IV

原子炉開発の黎明期（第 1 世代）、現行の軽水炉等（第 2 世代）、現在導入が開始されている改良型軽水炉等（第 3 世代）に続く原子力システムの概念の原子炉であり、経済性、安全性、持続可能性（省資源性と廃棄物の最小化）、核拡散抵抗性などを総合して他のエネルギー源に対して十分な優位性を持ち、2030 年頃に基幹エネルギーを担い得るものを目指し、各国が協力してその研究開発を進めている。協力研究テーマが幾つかあり各国がそれぞれ関心を持つテーマに参加しているなかで、超臨界二酸化炭素ガスタービンは唯一、日本、米国、フランス、韓国の 4 カ国すべてが参加している研究テーマであり、その国際的関心の高さがうかがい知れる。

【お問い合わせ先】

東京工業大学 原子炉工学研究所所長

教授 有富正憲

〒152-8550 東京都目黒区大岡山 2-12-1、N1-13

電話 : 03-5734-3050