

原研における高温作動型化学ヒート ポンプ開発の現状

石山新太郎、宇賀地弘和、衛藤基邦

日本原子力研究所・東海研究所 高温工学部
〒319-11 茨城県那珂郡東海村白方白根2の4

Recent Research Activities on High Temperature Chemical Heat Pump
in Japan Atomic Energy Research Institute(JAERI)

Shintaro ISHIYAMA, Hirokazu UGACHI, Motokuni ETO

JAERI has been developing a high temperature chemical heat pump, which can amplify thermal energy of the temperature 500°C to a maximum temperature above 1000°C as well as store mass hydrogen taking advantage of the metal-hydrode reaction. To testify the concept of this type of heat pump desingned, the heat pump element test facility are constructed to be tested its performance.

Present paper reports the resent research activities of the chemical heat pump system, including R&D on metal-hydride materials.

1. 緒言

日本原子力研究所（以下原研）で建設中の高温工学試験研究炉（HTTR = High Temperature Engineering Testing Reactor）は、最大熱出力30MW、最高出口温度850°C～950°Cの黒鉛減速ヘリウム冷却型の高温ガス炉であり、平成10年の臨界を目指して現在、原研大洗研究所内にその建設工事が急ピッチで進められている⁽¹⁾。本研究炉を利用した研究開発では、将来炉体を用いた高温照射試験や外部接続系として水素製造システムや多目的高温エネルギー利用システムなどの接続が検討されており、将来の核熱利用の拡大に備えた各種研究が展開中である。

原研では、このような核熱エネルギーを利用した水素製造システムや多目的熱エネルギーの効率的利用とその拡大を図るため、製造水素の大量貯蔵を可能とし同時に、HTTRの利用温度を1000°C以上に高温化するための金属水素化反応を利用した高温作動型化学ヒートポンプの開発を進めている（図1参照）⁽²⁾。図中ヒートポンプは、HTTRに接続された水素製造プラントから製造された水素エネルギーを大量貯蔵する機能の他、このプラントで使用された熱エネルギーを再度昇温して再びプラントに戻す機能、さらに、HTTRから直接発生する熱エネルギーを1000°C以上に熱増幅する（この温度領域からMHD等の直接発電技術と接点を有することになる⁽³⁾）機能を有し、これにより核熱エネルギーの多目的利用拡大を図る。

本論文では、原研におけるこれらの性能を有する水素吸蔵合金（以下MH）を用いた高温作動型化学ヒートポンプの開発の現状について報告する。

2. 化学ヒートポンプ要素の設計

2. 1 化学ヒートポンプの機能

上述のヒートポンプの基本的性能概念図を図2に示す。本システムは、基本的に1000℃以上の熱増幅を行うための高温作動型MHを充填した高温反応容器と、その際に必要な水素ガスを貯蔵・供給するためのMHを充填した低温反応容器とにより構成されており、この両容器間で水素ガスが循環するシステムとなっている。ただし、このループ内での水素ガス循環の方式では、両容器中のMHの水素化特性反応圧力の差圧を利用して低温反応容器側から高温反応容器側へ水素ガスが自然に流れ込むようにしており、一方、その逆の水素ガスの移動にはコンプレッサー等の外部仕事を加えて行う。

各反応容器を取り囲むそれぞれ個別のループは、ヘリウムガスを冷却剤とした熱交換ループであり、これによりシステム内の熱の授受及び熱増幅が効率的に行う。

このヒートポンプシステムの作動条件としては、まずこの高温反応容器側に原子炉やその利用系から発生する500℃程度の熱エネルギーを常時供給して中のMHを500℃程度に加熱すること、次にこれと別ないし高温反応容器中のMH加熱に利用した後の熱エネルギーの一部で100℃～300℃の熱エネルギーを低温反応容器側のMHの加熱に常に供給することが必要である。この条件の基で水素ガスを図2の通り循環させてやれば、水素ガスが容器内に取り込まれた際に生じる金属水素化反応による発熱エネルギーが得られ、当初MH加熱に利用していたヘリウムループを介してこの発熱エネルギーを取り出すことにより、高温反応容器側から800℃以上の高温熱エネルギーが、低温反応容器側からは300℃程度の熱出力をそれぞれ取り出すことができる。

つまり、このヒートポンプシステムに外部から500℃及び100℃～300℃の熱エネルギーを常時供給してやれば、それぞれの熱エネルギーを1000℃以上と300℃の熱エネルギーとしてそれぞれ高い熱変換効率で取り出すことができる。

2. 2 化学ヒートポンプ用高温作動型MHの開発⁽²⁾

原研では、本ヒートポンプシステムの運転条件、特にMH反応温度により500℃～1200℃までの高温金属水素化反応系と100℃～300℃までの低温金属水素化反応系としてそれぞれヒートポンプの使用条件を満足するMHの開発・評価試験を並行して進めており、高温反応系では、作動温度が500℃から1200℃までのMHとしてTi/Cr系金属間化合物が、低温反応系として300℃～500℃の温度範囲で水素を大量貯蔵するための材料としてCa/MgやCa/Ni系金属間化合物を試作・評価し、これらMHの性能曲線を得ている(図3; 図中、Ca1-Mg1~3の合金は、Ca:Mg元素比を示している)⁽²⁾。図中、実線に囲まれた範囲はそれぞれ、現在設計を進めているヒートポンプの高温及び低温反応MHの利用圧力/温度範囲を示している。これらMH試作材より得られたMH特性曲線からそれぞれのMHにおける反応圧力/温度の関係を図中直線で示した。これによると、Ti/Cr系MHで高温での実用域を、Ca/Mg系及びCa/Ni系MHで低温実用域をそれぞれ満足しているものであることが分かる。また、上述したように、低温反応容器から高温反応容器への水素ガスの移動は、図中で示された両MH材の反応差圧を利用して容易に行えることが分かる。

2. 3 化学ヒートポンプ要素試験装置の仕様

これらのデータを基に、現在500℃の熱エネルギーを1000℃以上に熱増幅するためのヒートポンプシステムの設計を進めるとともに、そのヒートポンプ要素を用いた実証試験ならびにヒートポンプシステム構築のための設計データ取得を目的として、平成6年度では図4に示すヒートポンプ要素、特に高温反応容器側による熱増幅試験を予定しており、3月現在要素試験装置の製作を終了して装置の運転予備試験を進めている。この計測システムでは、高温圧力容器外部から水素ガスポンプを用いて容器内に10kg/cm²以下の水素ガスを注入するとともに水素ガスの容器からの排出は真空ポンプを用いて行う。容器内のMHの加熱は、容器内に取り付けられたヒータを用いて外部から温度調整器により行い、容器内のMHを常に約500℃で保温しておく。MH反応により熱増幅された熱エネルギーの取り出しは、容器外部のヘリウムポンプから約40kg/cm²のヘリウム冷却剤を容器内に導入して容器内の熱交換チューブを通じて行い、加熱ヘリウムは出口温度を計測した後、クーラーに導き冷却後大気放出する。なお、熱増幅幅 ΔT やMH発熱・吸熱反応特性評価は、容器内各部温度の計測及び熱交換チューブ出口の温度計測データを基に、システム制御用パソコンを用いて伝熱計算により求める。

本ヒートポンプ要素の内部構造は、図4中の断面図に示すように、SUS製容器外壁、そしてその内部に断熱材（マイクロサーム[®]）、多孔質アルミナチューブ、Ti/Cr系MH粉末ならびに加熱用ヒータとヘリウム熱交換チューブから構成されており、容器外部から供給されアルミナチューブを透過してくる水素ガスをMHが吸蔵することにより発生する化学エネルギーをこの熱交換器を通して要素外部に伝達する構造となっている。

本装置、特に高温反応容器の設計条件ならびに熱解析結果を表1にまとめて示した。本設計では、Ti系MHを約3kg圧力容器に充填し、これを内部ヒータにより500℃で加熱しつつ水素ガスを最大3wt.%まで吸蔵させれば、MHより得られる総発熱量は、約6MJで、断熱材の熱ロスを30%見込んでも、リアクター部の昇温幅 ΔT は870℃以上が得られるという計算結果が得られた。つまり、原理的にはヒートポンプ要素を予め500℃で加熱しておれば要素内部の温度が1300℃以上になり、40kg/cm²Heの冷却剤により1200℃以上の熱がシステム外部に取り出せることを示している。しかしながら、図3に示したようにTi/Cr系MHの1200℃における水素化反応圧力を外挿評価した場合、10kg/cm²H₂程度の高圧を必要とすることとともに、1000℃以上の高温高圧下における熱交からの水素ガスの拡散・リークが予想されるため、現在1000℃出力を目標に要素を設計している。

3. 結 言

現在、原研では将来の核熱エネルギーの利用・拡大に備えて、高温ガス炉の研究開発ならびにガス炉を用いた熱利用技術の開発の一環として水素エネルギーの製造技術、熱エネルギー輸送・貯蔵・利用技術の確立を図るための各種研究を展開中である。

本論文では、特に熱エネルギーの貯蔵・利用技術の高性能・高度化を目的に、水素吸蔵合金を利用した高温作動型化学ヒートポンプの開発の現状について紹介した。本研究では、500℃以上及び300℃程度においてそれぞれ金属水素化反応を生じるMH材料の開発とその性能評価、ならびにこれらMHを用いて50

0℃の熱エネルギーを1000℃以上に熱増幅できるヒートポンプシステムの設計とそのための要素試験を実施中であり、平成6年度後半には、このヒートポンプ要素を用いた1000℃以上の高温出力試験を実施し、ヒートポンプ性能の実証試験を行い、さらに平成7年度後半には、この要素試験の結果を基に、図5に示す水素ガス循環型のヒートポンプシステムの製作・運転を予定している。この装置では、主に連続的に高温熱エネルギーをシステムから取り出すための最適条件を把握するために、サイクル速度、水素循環量、昇温速度等のデータを取得する予定である。

文 献

- (1) 日本原子力研究所、高温工学試験研究炉の現状、(1994年)
- (2) S. Ishiyama, H. Ugachi and M. Eto, Recent Research Activities of High Temperature Chemical Heat Pump with Metal Hydride Reactions for Gas Cooled Reactor Applications, Int. Symp. on Metal-Hydrogen Systems, November 6-11, (1994).
- (3) 山岬裕之、着実に開発進むMHD発電、電気誌、113巻、6月号、p. 473-476、(1993年)

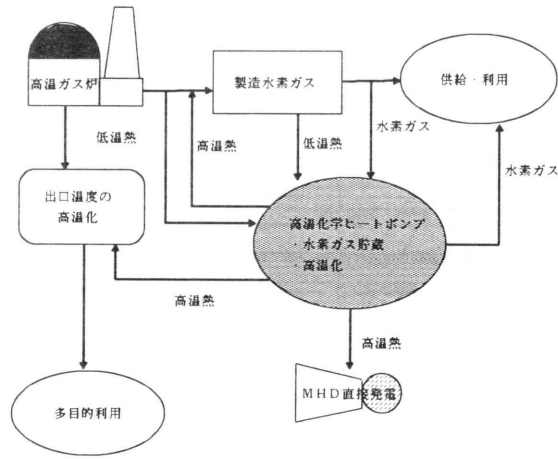
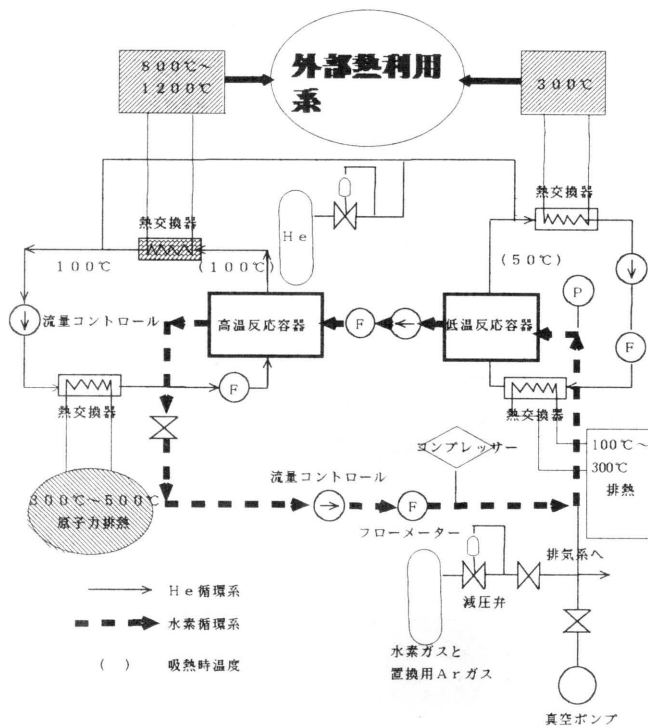


図1 高温ガス炉及び核熱エネルギー利用体系における高温作動型化学ヒートポンプの利用概念



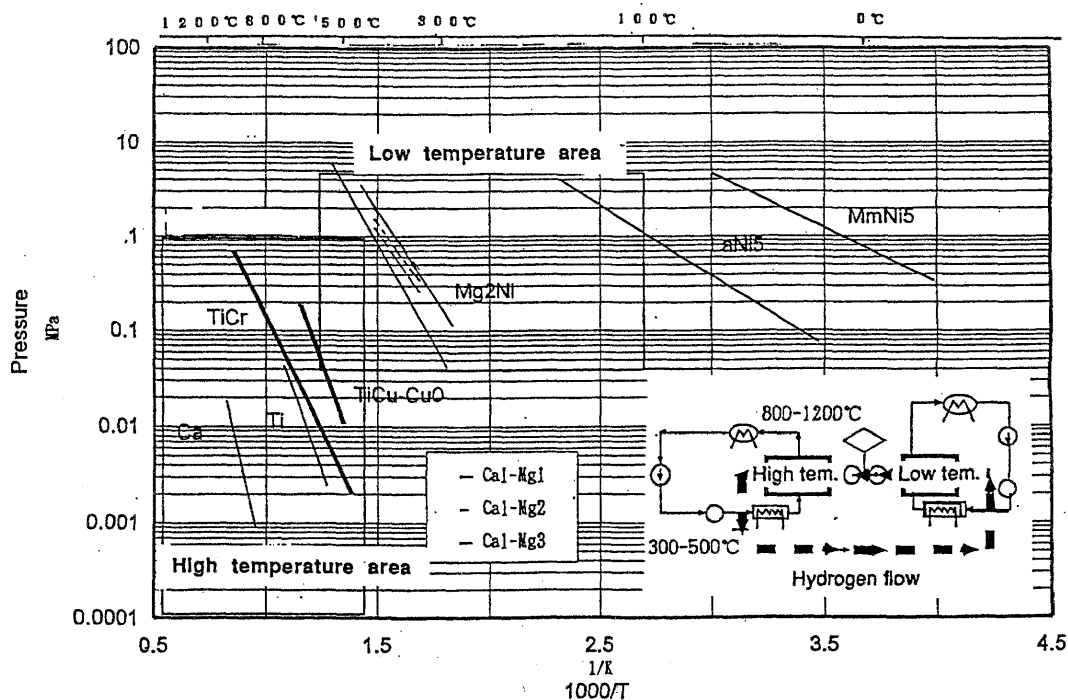


図3 各種金属水素吸蔵合金試作材反応温度・反応水素圧力との関係

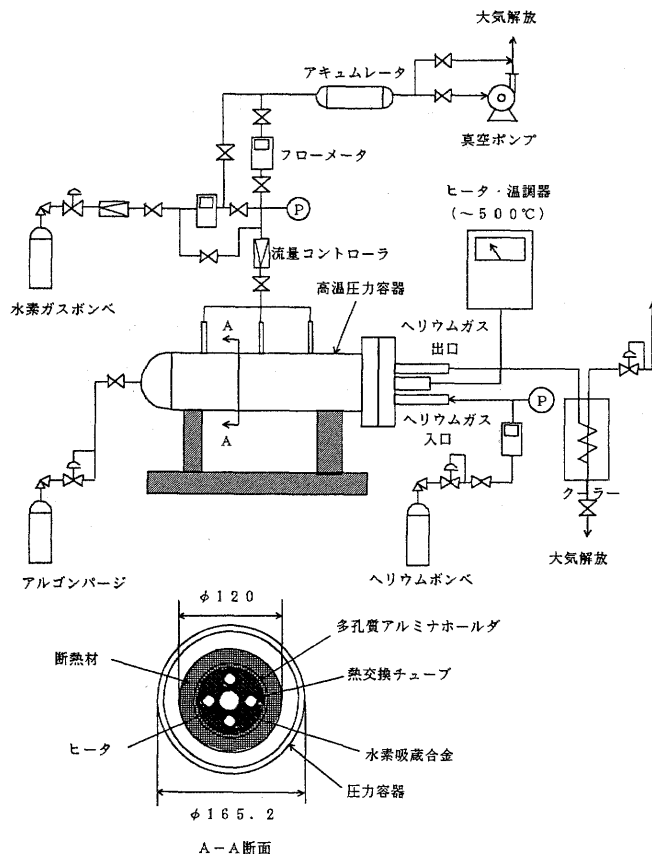


図4 高温作動型化学ヒートポンプ要素試験装置（高温圧力容器部）の構成

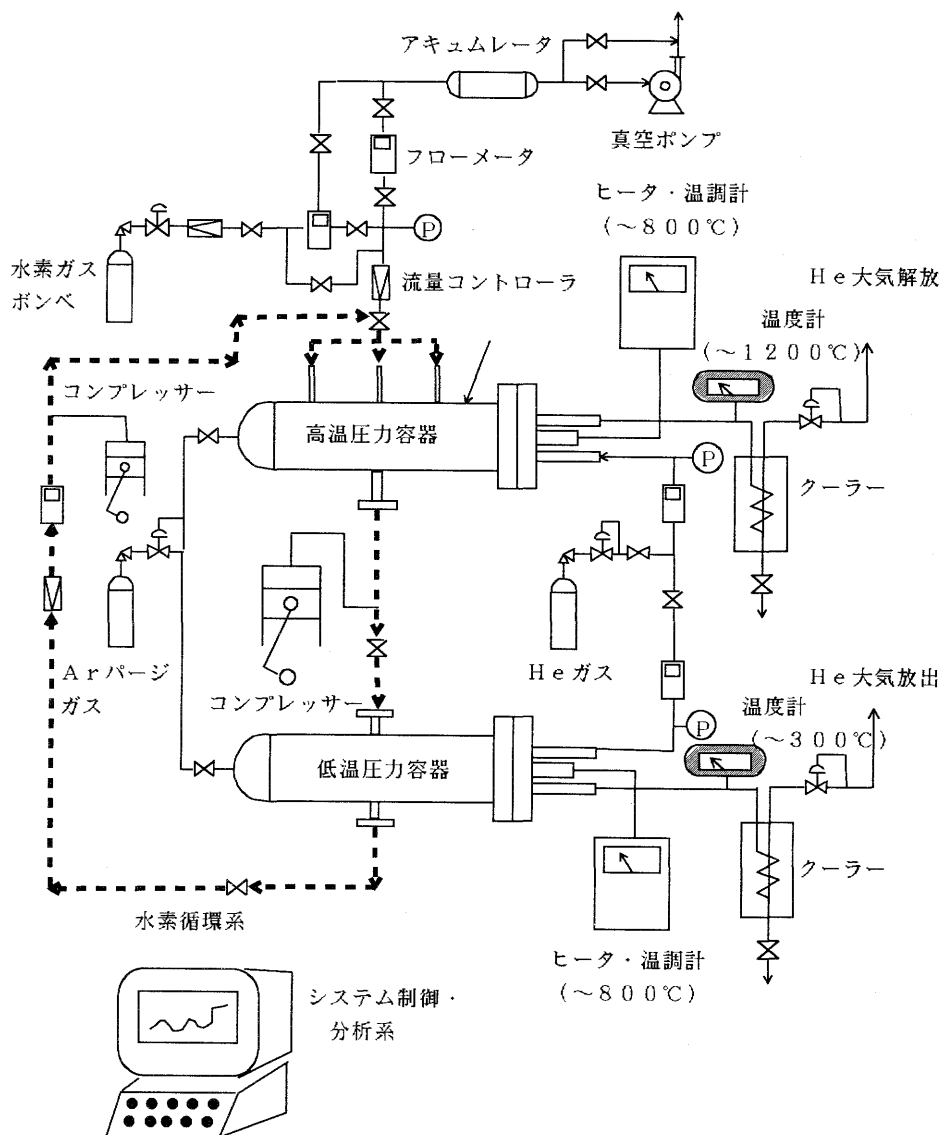


図5 高温作動型化学ヒートポンプシステム実証試験装置

表1 高温作動型ケミカルヒートポンプ要素の設計仕様の性能

[解析条件]	
He熱交管内径	= 4.35 mm
He熱交管外径	= 6.35 mm
He熱交管総長	= 3400 mm
MH総重量	= 3075.6 g
熱交換器材比重	= 9 g / cm ³
熱交換器材比熱	= 0.137 J / K g
MH比重	= 4.5 g / cm ³
MH比熱	= 0.52 J / k g
ヒーター部比重	= 9 g / cm ³
ヒーター部比熱	= 0.137 J / K g
ヒーター部外径	= 12.7 mm
ヒーター部長さ	= 850 mm
MHのΔH	= 125 kJ / mol H ₂ (= 29.9 Kcal / mol H ₂)
MHのwt. %水素吸蔵量	= 3 wt. %
He熱交の設計圧力	= 60 kg / cm ² G
He熱交の設計温度	= 850 °C
He熱交材質の設計温度における引張り強度	= 10 kg / mm ²
アルミナ製チューブ部比重	= 3.9 g / cm ³
アルミナ製チューブ部比熱	= 0.795 J / K g
内径	= 50 mm
外径	= 60 mm
全長	= 960 mm
断熱材部内径	= 60 mm
外径	= 120 mm
総長	= 960 mm
MH層前後の断熱材厚さ	= 30 mm
断熱層透過熱量割合	= 30 %
[熱計算結果]	
MH重量	= 3057.6 g
MHによる総発熱量	= 5.73 MJ
リアクター部総熱容量	= 6587 J / K
リアクター部の昇温幅(ΔT)	= 870.4 °C