

討24 内部断熱・外部水冷式圧力容器の開放検査結果および腐食量の統計解析

日本原子力研究所 ○近藤康雄 井岡郁夫 星 良雄

1. 緒言

装置や機器の使用温度が高温になるにつれて、機器を構成する材料の耐熱性の問題から種々の断熱方式や冷却方式の検討が行われてきているが、なかでも断熱材による断熱方式及び水冷ジャケットによる冷却方式は最もよく用いられている方法である。これらの方式は容易に実際面に適用でき、かつ比較的安価ではあるが、断熱材が多孔質体であるために内部の高温融体や高温気体が断熱材中を透過して機器の構成材料表面にホットスポットを形成し装置の寿命を短くしたり、冷却水の処理方法が適切でないで構成材料に各種の腐食障害を引き起こし思わぬ事故をまねく原因となることがある。

本稿では、多目的高温ガス実験炉の模擬実験装置として昭和57年3月に完成した大型構造機器実証試験装置（以下HENDELと称す）のうち、内部断熱・外部水冷方式の加熱器及び冷却器の2年間使用後の開放検査結果を基にして、これらの断熱・冷却方式を採用した高温構造物及び圧力容器の余寿命について検討した結果を示す。

2. HENDELの概要

日本原子力研究所では、多目的高温ガス実験炉を構成する燃料体・高温炉床構造物・中間熱交換器等の実証試験を行うために、大規模モデルにより実験炉の運転条件と同等の条件下での試験を行い、その性能、安全性を確認している。HENDEL (Helium Engineering Demonstration Loop) はこれらの目的を達成するための試験施設であり、全体系統図は図1に示す通りである。

HENDELは、マザーループ(M)、アダプターセクション(A)及び試験部(T)から成立している。これらのうち本体部であるM+Aループは、試験部に最高1000°C、4MPaのHeガスを供給する装置であり、昭和57年3月に完成した。一方、本体部と連結する試験部のうち、燃料体スタック実証試験部は昭和58年3月完成し現在試験を進めているが、他の試験部についても現在製作及び技術的調査検討を進めている。

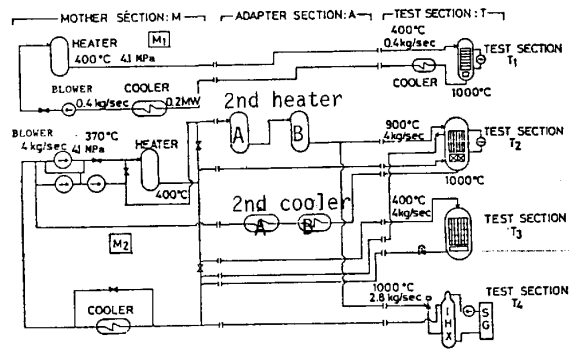


Fig.1 HENDEL Flow Diagram

3. 圧力容器の開放検査範囲

3.1. 検査物の仕様及び検査項目

HENDELを構成する機器のうち、昭和58年12月に第2加熱器2基(A, B)及び第2冷却器1基(A)の開放検査を行った。これらの検査物の仕様を表1に、また、加熱器Bの構造を図2に示す。他の2基についても加熱器Bとほぼ同じ構造であり、いずれの容器も内部断熱及び水冷ジャケットによる外部冷却方式を採用している。開放検査に伴い実施した検査項目を表2に示す。

Table 1 Specification of Pressure Vessels

	Heater A	Heater B	Cooler A
Type	Vertical cylinder		
Press.	4.0 MPa		
Temp.	350 °C	300	350
Material	SB49	SB46	SB49
Thickness	60 mm	42	55

Table 2 Inspection Items

Part	Item	Corrosion	MP Inspection	PT Inspection	Thickness	Structure	Hardness	Scale Analysis
		Heater A	BM	○	○	○	○	○
Heater B	BM	○	○	○	○	○	○	
	WM	○	○	○	○	○	○	
Cooler A	BM	○	○	○	○	○	○	
	WM	○	○	○	○	○	○	

BM: Base Material WM: Welded material

3.2. 検査物の運転実績

開放検査を行、た加熱器及び冷却器は、昭和57年3月の完成以来、750~950℃で640時間、950℃以上で340時間の運転を含め約1100時間の運転を行、た。運転は1年に4サイクル行い、1サイクルの期間は3~4週間で、他の期間は休止状態である。

4. 開放検査結果

加熱器A、B及び冷却器Aの圧力容器内外面の目視観察を行、た結果高温のHeガスに接する内側表面には特に異常は認められなかったが、冷却水に接する側の面には写真1に示すようにさびこぶを伴う激しい腐食が発見された。容器表面に付着した腐食生成物の約75%は Fe_2O_3 であり、さびこぶの下ではその最大深さが表3に示すような孔食が発生していた。また、加熱器Bの突合せ溶接部には写真2に示すように、溶接線に沿、て溶着金属と母材の境界部に最大深さ1.7mmの溝状腐食が認められた。

一方、加熱器Bの溶接部に発生した溝状腐食の原因を調査するために、溝状腐食周辺のSUME法による組織検査及び硬度測定を行、たが、特に異常な組織や硬度値は出現しなかった。また、冷却水の水質については、運転期間中の一部の期間に多少の問題はあったものの、大部分の期間では特に問題となる水処理状態ではなかった。

5. 圧力容器の余寿命推定

5.1. 均一腐食量

検査した3基の容器の中で最も腐食の激しか、た加熱器Bの一定面積(0.1 m^2)から採取した付着物量より推定した腐食度は11mdd(0.053mm/y)であった。一方、スフォールテストによる試験片の腐食度は水槽内試験(HENDEL休止中に相当)では2.5mdd、流動水中(流速0.4%)、HENDEL運転中に相当)では0.8mddであった。一般に流動水中では水の流速が材料の腐食速度に大きな影響を及ぼすが、加熱器Bの冷却水の流速は約0.03%でありスフォールテストの結果をそのまま適用できない。山本の実験によると、流速が0.03%の場合、流速が0.4%の場合の約4倍の腐食量を示しており、この結果を前述のスフォールテストの結果に適用すると、流動水中での推定腐食度は3.2mddとなる。

このことは、加熱器Bの均一腐食率はスフ

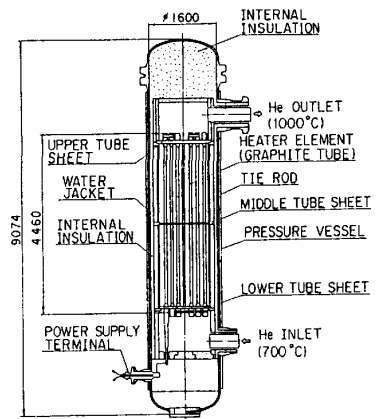


Fig. 2 Construction of Heater B

Table 3 Maximum Corrosion Depth

	HeaterA	HeaterB	CoolerA
General Corrosion		11 mdd	
Pitting	1.3 mm	0.6 mm/Y	0.1
Grooving Corrosion	-	1.7 mm	-

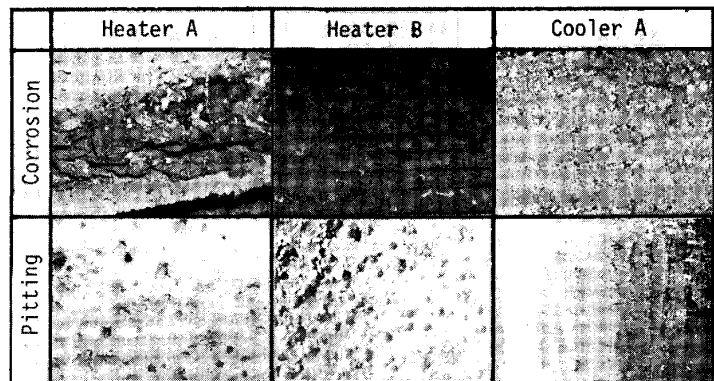
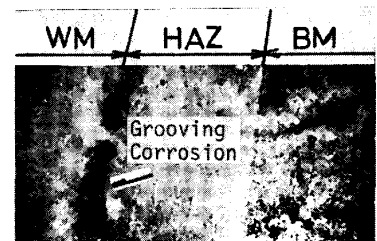


Photo.1 Corrosion and Pitting Observed in Pressure Vessels



Macro structure



Micro structure (X6.5)

Photo.2 Grooving Corrosion Observed in Heater B

ールテストの結果の3~4倍であり、安全係数として4を用いることによりスプールテストの結果から均一腐食量を推定できることを示している。他の2基についても、その腐食量が加熱器Bに比べ明らかに小さく、ことから、同様の方法により均一腐食量を安全側サイドで推定できることになる。

5.2. 孔食の成長速度

均一腐食量の推定については前述した通りであるが、実際に圧力容器の寿命を決定するのは、加熱器A及び冷却器Aでは孔食の、加熱器Bでは溝状腐食の成長速度であると考えられる。

一般に、孔食データに対しては極値解析が適用でき、また極値解析で得られた最大孔食深さの推定値を機器や試験片の使用時間に対し両対数プロットすることにより(1)式を満足する直線が得られることが知られている。

$$x_{max} = C \cdot t^n \quad (1)$$

ただし x_{max} : 時間 t 後の予想最大孔食深さ (mm)

t : 推定の時間 (day)

また、 C, n は定数であり、 n は一般に $1/3$ といわれている。²⁾ 各容器の現在までの使用年数 2年 = 730(日)及び表3に示した各容器での最大孔食深さを(1)式に代入し、 $n = 1/3$ を用いると、各容器の孔食の成長速度の推定式が次のように得られる。

加熱器A $x_{max} = 0.144 t^{1/3}$

加熱器B $x_{max} = 0.0667 t^{1/3}$

冷却器A $x_{max} = 0.011 t^{1/3}$

これらの関係を図3に示す。加熱器A及び冷却器Aについては、今後新たな問題が生じない限り孔食の成長速度が圧力容器の寿命を決定することになるが、孔食の成長速度が速い加熱器Aにおいても20年後の予想最大孔食深さは2.8mmであり、特に問題となる値ではない。

5.3. 加熱器Bに発生した溝状腐食の成長速度

加熱器Bの溶接線に沿って発生した溝状腐食の成長速度は表3にも示したように2年間で最大1.7mmであり、孔食の成長速度の約3倍にも達している。

図4は加熱器Bの全溶接線について磁粉探傷検査(MT)を行

った結果、発見された溝状腐食の深さの頻度分布を示したものである。溝状腐食の深さは1mm前後に集中しており、腐食の成長速度はほぼ一様であることがわかる。また、この頻度分布を正規確率紙にプロットすると図5に示すように1本の直線上にのることがわかる。

柴田の分類によると³⁾、正規分布に適合する腐食現象には孔食や隙間腐食深さがある。また、写

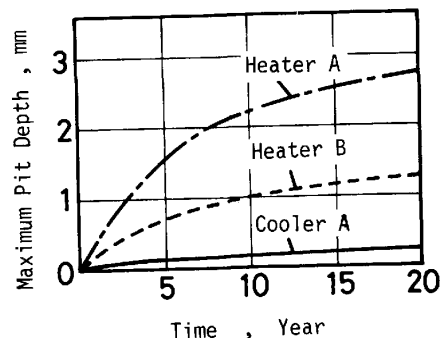


Fig.3 The Rate of Pit Growth

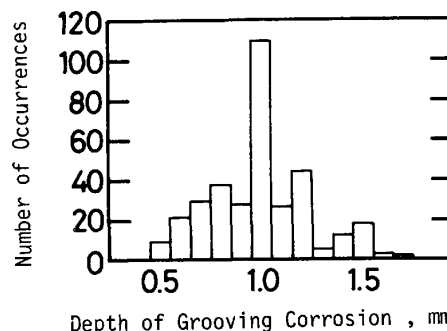


Fig.4 Histograms of Grooving Corrosion Depth observed in Heater B

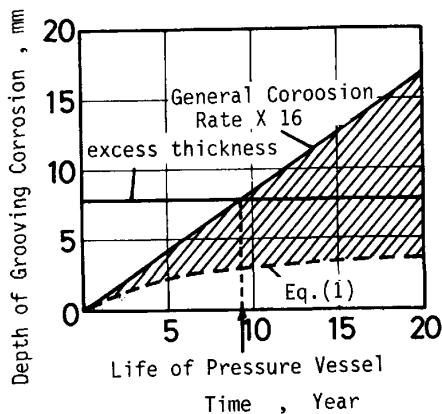


Fig.6 Life Prediction of Heater B

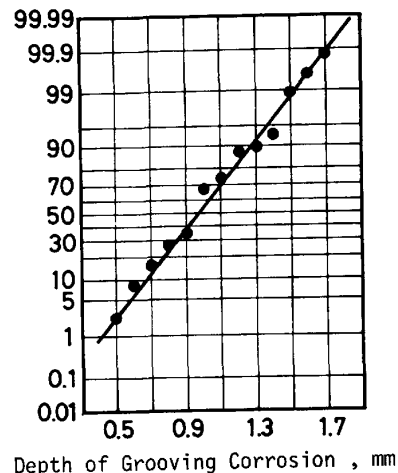


Fig.5 Normal Probability plot for Grooving Corrosion Depth

真2の顕微鏡組織から、溝状腐食は溶着金属と母材の境界に発生した孔食群が成長する過程で線状に連なつたものと考えられる。そこで、溝状腐食の成長速度が孔食の成長速度式である(1)式に従うものとするれば、溝状腐食の成長速度は $\alpha_{max} = 0.188 \text{ m}^2/\text{a}$ で推定できることになる。この推定式に従えば、20年後の溝状腐食の予想最大深さは3.65 mmとなる。

一方、加熱器Bに発生した溝状腐食は2年間使用後の最大深さが1.7 mmであることから、単純に最大深さを使用年数で割ると、溝状腐食の成長速度は0.85%/aとなる。この値は前述したように孔食の成長速度の約3倍、母材の均一腐食量の約16倍にも達している。仮に、溝状腐食が0.85%/aの成長速度で今後も成長するとすれば、図6の実線に示すような成長速度となり、加熱器Bの圧力容器は約9年で耐用年数に達することになる。

実際の溝状腐食の成長速度は図6の斜線の範囲内に入る可能性が強いが、今後の成長速度によっては圧力容器の寿命は極めて短くなる可能性がある。

6. 今後の課題

装置や機器の使用温度がますます高温になるにつれて、水冷方式を採用する機器は増加するであろうが、構成材料の腐食、特に孔食等の局部腐食の防止対策が重要な課題となる。一般に孔食等の腐食は温度の影響を受け易く、構成材料の温度分布の状態も腐食の成長速度に影響するものと考えられる。

図7は筆者らが開発を進めている、二次元水平断熱層内の透過流解析コードのモデルを示したもので、ライナ管上の均圧孔を介してHeガスが断熱層内を透過した場合の耐圧管の温度分布が計算できる。図8に解析結果の一例を示す。この例では、透過流の上流側と下流側では耐圧管に約300℃の温度差が生じている。このように耐圧管に温度差が生じると局部的に伝熱量が異なり、これが原因となって局部腐食を促進する可能性がある。従って、被水冷面が伝熱面であり、かつ伝熱面に温度差が生じる場合には、伝熱面の内外両面の状態を常時モニタリングし、異常が発見された場合に速やかに対処できる保守保安体制を確立する必要がある。

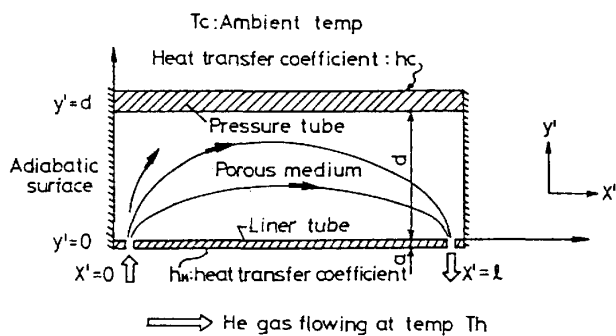


Fig.7 A Computation Model for Permeation Flow Analysis

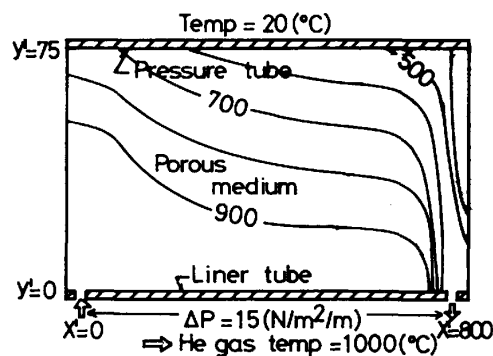


Fig.8 An Example of Calculation Result

あわりに、本稿をまとめるにあたり、貴重な実験データを御提供下さった、(株)練水サービス、栗田工業(株)、石川島検査計測(株)様に御礼申し上げます。また、本稿作成の直接の原動力となっていた下村寛昭、田中利幸室長はじめ日本原子力研究所NABEL管理室開発試験室の皆様へ感謝致します。

文献 1) 山本大輔：金属化学 2 (1961), 21
 2) 石川雄一：防食技術 28 (1979), 278
 3) 柴田俊夫：金属表面技術 31 (1980), 336