計測自動制御学会東北支部 第 208 回研究集会 (2003.5.22) 資料番号 208-8

BWR 条件水ループにおける破断兆候の早期発見に関する研究

Early Detection of the Material Degradation on the under the Water Condition similar to that of the Boiling Water Reactor

○玉木 雄二*, 辻元 洋典**, 高橋 信*, 北村 正晴* ○Yuji Tamaki*, Yousuke Tsujimoto**, Makoto Takahashi* and Masaharu Kitamura*

> *東北大学大学院工学研究科 *School of Engineering, Tohoku University

キーワード:応力腐食割れ(Stress Corrosion Cracking), 沸騰水型原子力発電所(Boiling Water Reactor), システム安全裕度テストベンチ(System Safety Benchmark Facility), Leak Before Break, 温度・湿度計測(Measuring of Temperature and Humidity)

 連絡先: 〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 01 東北大学大学院工学研究科 量子エネルギー工学専攻 北村研究室 玉木雄二 Tel/Fax(022)217-7921, E-mail: y.tamaki@luke.qse.tohoku.ac.jp

1. 諸言

原子力発電所は、社会的にもその安全性が 重要視される大規模機械システムであり、原 子力発電所での事故による人命の損失や環境 への悪影響は、あらゆる手段を用いて防いで いかなければならない。原子力発電所の安全 性・信頼性の向上というものは、格段に高い レベルの実現が要請され、達成されなければ ならない。このような要請に対して、原子力 発電所の安全性・信頼性に対して影響を与え る様々な要素に関して研究が行われてきた¹⁾。

原子力発電所のハードウエア面での安全性 向上という点において、近年、重要視されて いる問題として材料劣化破壊に伴う異常事例 があげられる。例えば、沸騰水型原子力発電 所(Boiling Water Reactor:以後 BWR)での 応力腐食割れを起因とする故障事例が報告さ れており、2001年に起きた浜岡原子力発電所 における制御棒駆動機構ハウジング部からの 漏洩も、応力腐食割れを起因とするものであった²⁾。このような問題に対して、複合環境 下での材料破壊の予測という点から、東北大 学工学部では破壊制御システム研究施設を中 心として材料に関する破壊メカニズムの研究 が行われており、本研究もこのプロジェクト の一環として行っている。

応力腐食割れは「材料の使用環境」、「材料 に加わる力」、「材料の性質」の3つの要因が 特定の条件で重なり合ったときに生起する³⁰。 このような特定の条件を満たしやすい環境と して、苛酷環境である高温高圧配管の溶接部 があげられる。実際に、原子力発電所での応 力腐食割れを起因とする故障事例の多くは配 管溶接部で起きている。高温高圧配管部は原 子力発電所の保守において重要な箇所である。 しかし、複雑で膨大な原子力発電所の配管部 の、すべての材料破壊を予測し、防ぐことは 現状では困難である。したがって、材料破壊 の予測技術に関する研究を進めるとともに、 配管部分の割れによる漏洩を早期に検出する 技術が必要である。現在の原子力発電所では、 配管部分から漏洩が起きても安全性が十分に 確保できるように対策が講じられている。し かし、より高いレベルの安全性・信頼性を実 現するためには、このようなトラブルの兆候 を運転中に捉え、早期に対策を講ずることが 重要であると考えられる。すなわち、Leak Before Break の段階で材料破壊兆候を検出 する技術が求められている。

以上の背景を踏まえ、本研究では BWR 環 境での高温高圧配管部における材料破壊兆 候の早期検出を目標に掲げる。

材料破壊を早期に検出するためには、材料 破壊時にどのような現象が生起し、それが計 測値にどのように表れるかを明確にしなけれ ばならない。そのため、材料破壊によって生 じる計測値の有意な変化を、原子力発電所配 管部での材料劣化破壊を模擬した実験装置の 計測データから検出し、その原因を考察する。

2. 手法~実験環境と計測系について

本研究で用いた実験装置は、BWR の放射 性物質以外の水環境を模擬し、その環境下で 構造材がどのように変化するか、またそれに 伴って水環境がどのように変わっていくかを 評価することを目的としている。実験の目的 に応じて、特定の水環境(溶存酸素量、流量、 温度、圧力等)を設定し、構造材に対して特 定の荷重負荷をかけることが可能である。構 造材についても、試験片の材料、形状を設定 することが可能である。つまり、環境、材料、 そして荷重の応力腐食割れの生起条件を設定 し、それらとき裂の進展の因果関係について 検討することが可能となっている。

材料破壊の初期兆候を計測データから検出 するには、多方面から計測を行うことが望ま しい。そこで本研究では、新たに設置したセ ンサのほかに、SSBF に既存のシステム制御 を目的としたセンサの値も解析の対象として いる。また、これらの計測系から得られる大 量の情報を効率的に取得、共有することを目 的として、先行研究によりオンラインシステ ムを用いた自動計測システムが構築され、実 際の実験において利用されている⁴⁾。

2.1 システム安全裕度テストベンチ

システム安全裕度テストベンチ(System Safety Benchmark Facility:以後 SSBF)の目 的は、複雑な環境体系での大規模システムに おける生起事象を予見し、その知識を踏まえ てシステムとしての安全裕度を評価すること である。本装置の概観を Fig.1 に示す。SSBF は、並列テストセクションを備えた高温高圧 水ループ方式を採用している。並列テストセ クションの異なる点は流速の大小である。 Fig.1 において No1、No2 と明記されている が、この中には高温高圧の水が流れる試験片 が設置されており、各々のテストセクション は流速を制御することが可能である。以後、 本論文では高流速の流体が循環するテストセ クションを高流速ループ、低流速の方を低流 速ループとする。流速の違いを生起させるた めの構造的な制約から、二つのテストセクシ ョンのループ経路は若干異なるが、その他の 環境(水環境、荷重など)はまったく同じに なっている。本装置の仕様を Table 1 に示す。

SSBF を用いて、高温高圧水中における原 子力金属材料試験片(パイプ試験片)の荷重 負荷試験を実施している。各々のプロテクタ 一内部には試験片が設置され、荷重負荷をか けるとともに水質調整を行った高温高圧水を 試験片内部に送り出し、循環させる。このよ うなループを作ることにより、原子力発電所 の水環境を再現し、高温高圧環境での応力腐 食割れを促進させる。試験片にはスリット(切 りかき)が設けられており、基本的にはその 箇所で応力腐食割れが生じ、試験片外表面ま で割れが進展するまで行われ、実験期間は数 ヶ月に及ぶ。第1回目実験終了時のき裂の様 子を Fig.2 に示す。Fig.2 は、第1回実験後 のき裂正面・き裂断面の写真である。き裂の 進展により試験片表面に発生した割れは、長 さ2.7mm、平均幅5.1×10-2mmと、大変小 さなものであるが、内圧が高いために水の漏 洩を引き起こす。このような割れが試験片に 発生し、最終的にSSBFの安全停止装置によ りシステムが停止する。



Fig.1 システム安全裕度ベンチ(左) と試験片の写真(右)

Table 1 SSBF の仕様

		低流速ループ	高流速ループ
設計条件	温度	325°C	
	圧力	16MPa	
運転条件	温度	320°C	
	圧力	15MPa	
	流量(低圧条件下)	60L/hr * 2 circuits	
流量		1L/min	74~145L/min
流速		0.55~0.180m/sec	8.0m/sec
荷重制御	荷重	± 10 kN(Static)	
		±90kN(Dynamic)	
	ピストン変位	−10 [~] +30mm	
	負荷パターン	sine wave, traiangular wave,	
		sawtooth wave, trapezoidal wave	
	計測精度	±1%(荷重)	
		±1%(ピストン変位)	





2.2 試験片

本実験に用いた試験片の形状を Fig.3 に示 す。本試験片は溶接部を含んだ原子炉配管を 模擬している。内径 50mm、外径 58mm、管 厚 4mm の SUS304・SUS304L・SUS316L がそれぞれ溶着金属 Alloy182 を用いて溶接 されている。これらの材料は実際の原子炉配 管に用いられているものと同等である。なお、 溶接において生じる余盛は、管内面および外 面ともに除去しており十分に滑らかな面とな っている。

試験片の管内面には、放電加工(Electric Discharge Machining, EDM)によって楕円 形のスリットが数箇所設けられている。



 $\Gamma Ig.0 = M_{OR}/(0.7)$

2.3 計測系

本研究目的において用いた計測系は以下の 2つである。

1.テストベンチループ系に関わる水質・温 度・負荷などのプロセスパラメータ

2.試験片周辺の雰囲気中における温度・湿度 の計測

また、長期の計測を支援する自動計測シス テムについても述べる。

2.3.1 プロセスパラメータ

テストベンチループ系の計測値は、SSBF の制御・監視を目的として予め設置されてい るもので、全部で 29 個のパラメータが存在 する。計測部分の配置図と各計測パラメータ の説明をそれぞれ Fig.4 に示す。このような、 既存の計測値も利用して材料破壊兆候の検出 を多方面からアプローチした。また、プロセ スパラメータを解析することにより、SSBF が停止した時間(SSBFが材料破壊を検知し た時間)を知ることができる。本研究におい て得られた材料破壊兆候は、このSSBFの停 止時刻よりも十分に早い時刻に材料破壊を検 知できるものである。



Fig. 4 SSBF のプロセスパラメータ

2.3.2 試験片周辺の温湿度計測

1) 温湿度計の仕様

本研究では温湿度計として、温湿度変換器 THT-RV2(神栄株式会社)を用いた。温湿度 計の概要と仕様を Fig.5、Table 2 に示す。湿 度素子はロトニック社の高分子容量型素子 HYGROMER を用いている。湿度素子の計測 範囲は-50~+200℃であり、高温・低湿の本実 験環境に適している。

素子部の保護のために計測器の先端にはフ ィルターが取り付けられている。本実験環境 を考えて、フィルターはテフロン製の SP-TF15(神栄株式会社)を用いた。これは 孔径が小さく、疎水性のため飛沫がかかるよ うな雰囲気に適している。

温度測定は測温抵抗体 Pt100Ω 3線式抵抗出力をもちいている。測温抵抗体は 600℃以下の雰囲気温度の測定としては最もよい精度が望める。側温抵抗体は、プロテクター内

の雰囲気温度を計測するために用いている。 以後、側温抵抗体の測定値を雰囲気温度とす る。

抵抗出力はデジタル指示調節器を用いて電 圧出力とし、AD 変換ボード National Instruments PCI – MIO - 16E - 4を介して コンピュータにデータを転送している。これ により、自動計測システムを利用して計測値 のオンライン監視が可能となっている。



フランジ

Fig.5 温湿度センサ概要

Table 2 温湿度センサ仕様

測定温度範囲	(センサ部)-50~200℃		
測定湿度範囲	0∼100%rh(at 0~80°C)		
温度精度	Pt100Ω 1/3DIN (JIS C 1604-1997 CLASS A相当)		
湿度精度	±3%rh(at25℃、10~95%rh)		
温度出力	Pt100Ω3線式抵抗出力		
湿度素子	高分子容量型センサ Hygromer IN-1(ロトニック社)		

3) 設置環境

温湿度計の設置環境を Fig.6 に示す。温湿 度計はプロテクターの上部に、フランジを用 いて固定している。カップリングは AC1303 を用い、フランジは設置環境を考慮して製作 した。ボルトで取り付けてあるため、実験中 でも取りはずしが容易である。周辺環境は高 温低湿(約 100℃、約 5%rh)であるが、本 センサは十分耐えうる仕様となっている。ま た、プロテクター上部には、リーク時に水蒸 気を逃すための通風口が設けられて、プロテ クター内は、ほぼ大気圧下にあると考えてよ い。



Fig. 6 温湿度センサ設置概要

2.3.3 自動計測システム

本実験は、き裂が外表面上に達し、リーク が発生するまで続けられ、実験開始から終了 までは数ヶ月に及ぶ。また、同じ実験設備を 用いて同時に実験を行っていることから、デ ータの共有化を図る必要がある。これらの問 題を解決するために、自動的に実験データを 計測し、インターネットを用いて実験データ の閲覧および取得が可能なシステムが先行研 究により構築されている⁴⁾。自動計測システ ムの概要を Fig.7 に示す。



3. 実験結果とその考察

SSBF 停止前のデータから検出した材料破 壊兆候について述べる。それぞれの材料破壊 兆候について、代表的な測定データとその特 徴・材料破壊との関係を述べる。

尚、SSBF 停止は、循環水の圧力が規定値

を下回ったために行われた。この SSBF の停 止時刻を、システムとして材料破壊を検知し た時刻とし、これ以前の計測値の有意な変化 を材料破壊兆候の対象として解析を行った。 以下で述べる材料破壊兆候は、複数回の実験 において、計測値の変化が特に早期に起こり、 その物理的根拠がはっきりしているものであ る。

3.1 試験片壁面温度の低下

試験片壁面温度の実験データを Fig.8 に図 示する。この実験データは、SSBF 停止時刻 前の試験片壁面温度の挙動であり、同一の試 験片壁面の異なる箇所(試験片の中部と下部) の計測データを示している。システムの停止 約3時間前に試験片壁面温度の低下が始まり、 その後徐々に試験片壁面温度が低下している ことが分かる。このような低下がみられる前 は、試験片壁面温度はほぼ一定の値を保って いる。

また、試験片壁面温度は試験片の数箇所で 計測されており、すべての箇所でこのような 温度低下がみられた。



試験片壁面温度の低下が材料破壊(試験片の割れ発生)により生起したと考えると、割れから水が流出し、その結果水が蒸発、そのときの気化熱により温度が低下、という事象が考えられる。温度の低下が試験片全体で起こったこと、雰囲気温度が低下したことから、水が割れから"噴出"し、プロテクター内に

拡散したと考えられる。また、割れの面積が 微小であることから、噴出した水は、気体・ 液体の二層流がミストの状態で噴出すること が予想される(二層噴流)。気流中に微小液滴 を混濁した混層流によるミスト冷却は、単層 流に比べて著しい伝熱促進をもたらす ⁵こと が知られている。また、ミスト冷却は気流境 界層内での液滴蒸発、加熱面での液滴の付 着・蒸発さらには壁面に形成された液膜から の蒸発および液膜流によるエンタルピー輸送 などの効果による ⁵。したがって、試験片壁 面温度低下の原因は、割れより噴出した水の 試験片表面での気化と、試験片付近の気体中 での気化であると考えられる。

3.3 プロテクター内湿度の増加

Fig.9 に SSBF 停止前の相対湿度の値を示 す。Fig.9 から、システム停止前に相対湿度 が上昇していることがわかる。この後急激に 湿度の値は上昇し、数分後プロテクター内の 湿度は飽和状態に達するまた、湿度上昇前の 計測値は、一定の値に保たれていた。

このような湿度の増加は、試験片からの漏 洩によりプロテクター内の水蒸気量が増加し たためと考えられる。また、プロテクター内 の環境が高温・低湿(100℃、5%rh)であり 僅かな漏洩が直に気化する状態にあること、 プロテクター内という限定された領域である ことからこのような顕著な変化になったと考 えられる。



Fig.9 SSBF 停止前のプロテクター内湿度

3.3 プロテクター内雰囲気温度の低下

Fig.10にSSBF停止前のプロテクター内雰 囲気温度の実験データを示す。Fig.10 から、 システム停止前に雰囲気温度が低下している ことがわかる。低下が始まったのは、試験片 壁面温度の低下とほぼ同じ時刻であった。雰 囲気温度は急激な低下を示してから一時的に 増加し、その後緩やかに減少している。また、 このような温度低下がみられる前は、計測値 はほぼ一定の値を保っていた。

雰囲気温度がこのような挙動をとった理由 としては以下のことが考えられる。試験片で の割れからの二層噴流が気化し、壁面温度を 低下させることは述べた。壁面温度の低下に より、雰囲気温度も低下したとも考えられる が、雰囲気温度低下の挙動と、壁面温度低下 の挙動は異なる。例えば、雰囲気温度の一時 的な低下は、壁面温度には見られない特徴で ある。よって、割れの発生により噴出した水 の雰囲気中での気化が、雰囲気温度の低下に 大きな影響を与えていると考えることができ る。



3.4 相対湿度と雰囲気温度の関係

Fig.11 に、SSBF 停止前の相対湿度と雰囲 気温度の変化を同時に示す。Fig.11 から、最 初の雰囲気温度の低下時には、相対湿度も上 昇していることが分かる。このことは、雰囲 気温度の低下が漏洩により起こったことを示 している。また、相対湿度が 100%に達する と、雰囲気温度は低下しなくなることが分か る。これは、相対湿度が 100%に近いほど、 空気中の水の気化(雰囲気温度の減少)は抑 制され、逆に相対湿度が小さいほど、水の気 化が激しいためと考えられる。同様にして、 雰囲気温度の一時的な低下も、漏洩初期はプ ロテクター内が低湿度状態であったために気 化が激しく起こり、湿度の上昇に伴い、気化 が抑制され温度が上昇したと考えられる。こ のような雰囲気温度と相対湿度の関係は、雰 囲気温度の減少が雰囲気中の水の気化を原因 としていることを示している。



Fig.11 プロテクター内の雰囲気温度 (実線) と相対湿度(点線)の変化

4.結言

本研究では、高温高圧配管部における材料 破壊兆候の早期検出を目的として取り組んだ。 その結果、BWR 水環境での材料破壊を模擬 した実験装置において多方面からの計測を行 い、上述したような複数の材料破壊の初期兆 候を検出することができた。

本研究の実験環境は、放射性物質の取り扱い以外は BWR 環境における高温高圧配管部の水環境を模擬している。このような環境で得られた材料破壊兆候に関する知見は、実際の原子力発電所においても十分適応可能であると考えられる。

今後は、同様の実験を継続して行い、材料 破壊兆候を早期に発見し、材料劣化の確実な 検知を行う手法の確立を目指す。

具体的には以下の研究内容が考えられる。 1)本研究で確認された材料破壊兆候につい て、計測方法を改良しながら今後も継続して 計測を行い、計測値挙動のより詳細な解明を 行う。

2)より早期の(漏洩前の)材料破壊兆候の 検出を可能にする計測手法・データ解析手法 を提案・評価する。

本研究は文部省中核的研究拠点(COE)形成 プログラム(COE research-11CE2003)の支 援を受けて行われている。

参考文献

¹⁾ 北村他:安全の探求、224/252、ERC 出版 (2001)

²⁾ 浜岡原子力発電所1号機 制御棒駆動機構 ハウジング部からの漏洩に関する原因と対策 について

http://www.chuden.co.jp/press/data/pre200 2/pre0424_04.html

³⁾ 辻川茂男:材料環境学入門 腐食防食協会 編、丸善株式会社(1993)

4) 辻元洋典:破壊制御実験の統合データ管理 システムの開発、平成 14 年度修士論文、東 北大学大学院工学研究科

⁵⁾ 日本機械学会: 伝熱工学資料、114/126、日 本機械学会(1986)