

T 225-77-03
JWES-AE-7702

本資料は 年 月 日付けで登録区分、
変更する。

01.11.30

[技術情報室]

昭和51年度動力炉・核燃料開発事業団委託研究

AE実用化のための予備調査

成果報告書

1977年6月

社団法人 日本溶接協会
原子力研究委員会
FAE小委員会

本資料の全部または一部を複写・複製・転載する場合は、下記にお問い合わせください。

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村大字村松4番地49
核燃料サイクル開発機構
技術展開部 技術協力課

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:
Technical Cooperation Section,
Technology Management Division,
Japan Nuclear Cycle Development Institute
4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki, 319-1184
Japan

© 核燃料サイクル開発機構 (Japan Nuclear Cycle Development Institute)

Study of Acoustic Emission Technique
for Fast Breeder Reactors.

F AE Subcommittee,
Atomic Energy Research Committee,
The Japan Welding Engineering Society

ABSTRACT

Acoustic emission technique has made a
remarkable progress in recent years.

Many papers and reports have been
written in this field, however,
a few reports are published on
acoustic emission techniques
which are directly connected with
on-line-monitoring for FBR.

Here are the translated excerpts from
such papers, and a viewpoint
of FAE subcommittee is
presented on the development of
acoustic emission monitoring.

目 次

1 章	序にかえて	13
2 章	文献抄訳	15
3 章	各論のまとめ	83
3.1	構造材料のA E基本特性	85
3.2	変換子, 導波棒	90
3.3	環境雑音	98
3.4	信号処理	102
3.5	原子力における適用例	106
4 章	調査文献の総括	109
5 章	— Appendix — A E法による材料評価に関する一提言	110
5.1	現状把握	110
5.2	F B Rにおける対象モデル	111
5.3	欠陥表示パラメーター	111
	— 亀裂面積Sの導入 —	
5.4	A E発生源とその分離	113
5.5	A EアクティビティとA Eパラメーター	116
5.6	亀裂面積とA E	118
6 章	A E研究の今後の進め方に関する一案	121
7 章	結 言	122

I 概 要

概 要

1. 題 目

AE実用化のための予備調査

2. 調査の目的

AE (Acoustic Emission) 法を用いた FBR 1次冷却系配管の供用中における監視法の開発は、当AE法が稼働中の構造要素の構造健全性を遠隔にかつ広範囲に監視しうる可能性を有するため、実用化に向けて大きな期待が寄せられている。

AE法に関しては、近年、世界各所にて精力的な研究開発が進められているが、構造物の供用中監視の一方法として注目されてから未だ日も浅いため、FBR機器への実用化をはかるにあたっては、未知の要素も多いことが懸念される。

したがって、FBR 1次冷却系配管の供用中監視方法としてAE法を実用化するにあたって考慮しなければならない種々の事項について、現時点において入手可能な情報の調査活動を行ない、AE法の実用化にあたって今後研究開発が必要な項目を明らかにすることを目的として調査を行なった。

3. 業務の範囲

3.1 調 査

3.2 報告書の作成

4. 業務の内容

4.1 調 査

以下の各項目について、現在入手可能な情報の調査を行なった。また、全項目を通しての適用性の総合評価を行ない、現時点においてAE法により検査・監視が可能な領域および今後の開発課題を総合的に評価した。

(1) 構造材料のAE基本特性

FBRにおいて使用が予想される Type 304 ss, Type 316 ss, $2\frac{1}{4}$ Cr-1Mo 鋼に関して疲れ破壊・応力腐食割れ等各種破壊モード下におけるAE放出特性

(2) 構造要素の基本的音響特性

一般に、三次元的形状を有する各種構造要素における音響の減衰、波形変化等の基本的音響特性

(3) バックグラウンドノイズ

FBR環境もしくはFBR類似環境における音響のバックグラウンドスペクトラム

(4) AEトランスデューサ

FBRにおいて使用可能なAEトランスデューサ，その特性およびその取付法

(5) 信号処理法

従来開発されたAE信号処理システム信号処理論理およびその有効性

特に，位置標定技法およびそれに付随する各種論理

5. 実施方法および報告書作成

本調査業務を行なうため，日本溶接協会原子力研究委員会では，FAE委員会を設立し，作業を担当し，報告書を作成した。

以上

F A E 小委員会名簿

主 査	飯 田 國 廣	東京大学 船舶工学科
副主査	尾 上 守 夫	東京大学 生産技術研究所
幹 事	岸 輝 雄	東京大学 宇宙航空研究所
"	羽田野 甫	東京工業大学 精密工学研究所
"	榊 昌 英	船舶技術研究所
"	仲 佐 博 裕	(財)電力中央研究所エネルギー環境技術研究所
"	金 原 勲	東京大学 船舶工学科
中立委員	石 井 勇五郎	日本大学 工学部
"	小 倉 信 和	横浜国立大学 エネルギー材料研究施設
"	藤 村 理 人	I S E S 事務局長
"	宮 園 昭八郎	日本原子力研究所 構造強度研究室
委 員	有 井 満	東京芝浦電気(株)第1原子力システム部技術主管
"	原 田 鉄 造	川崎重工業(株)技術研究所材料研究室
"	中 村 哲 男	三菱重工業(株)高砂研究所電子技術研究室
"	中 島 玉 雄	石川島播磨重工業(株)技術研究所基礎技術部
"	佐々木 莊 二	(株)日立製作所 日立研究所第9部
"	丸 山 温	日本鋼管(株)技術研究所
"	渡 辺 哲 夫	新日本製鉄(株)エンジニアリング事業本部開発部
"	白 岩 俊 男	住友金属工業(株)中央技術研究所
"	高 橋 英 司	(株)神戸製鋼所中央研究所
"	高 沖 亮	(株)日本製鋼所鉄鋼技術部
委託者側委員	岡 林 邦 夫	
	永 田 敬	

1 章 序にかえて

Acoustic Emission(以下A Eと略)法は、近年、その動的な監視能力のゆえに新しい安全監視法として非破壊検査の分野において、おおいに注目されるにいたっている。原子力機器に適用するにあたり、このA E法は、使用前(PSI)、使用中(ISI)の構造物の検査手段として、又、運転中の連続監視の手段として用いられている。前者の適用に関しては、A E法は既に実用の段階に近づいていると云える。一方、運転中の連続監視に関しては、変換子の耐久性、耐高温度性、その較正法、機器の各所により生ずる雑音、信号処理法、得られた信号の材料的評価法等の多くの問題をかかえ、このA E法の実用化は実機適用の基礎資料の乏しさと相まって、未だ開発要素を数多く含んだものと云わざるをえない。しかしながら、A E法の持つ、他の手法にない潜在的な特性を考えると、将来、PSI、ISIのみならず運転中監視技法として広く用いられ、原子力機器の信頼性安全性監視の中心的検査手段に発展してゆくことは、十分に期待しうる所である。このような現状において、FBRの領域においても、A E法を用いたFBR 1次冷却系配管の供用中における監視法の開発は、A E法が稼動中の構造要素の構造健全性を遠隔にて、かつ広範囲に監視しうる可能性を有するため、実用化に向けて大きな期待が寄せられている。しかしながら、上述の如く、A E法そのものの未確定要素に加えて、FBR自身が、未だ開発途上のものであり、実機による資料採取が難かしく、FBR機器への実用化をはかるにあたっては、未知の要素も多いことが懸念されている。したがって、本委員会(FAE小委員会)では、FBR 1次冷却系配管系の供用中監視手法としてA E法を実用化するにあたって考慮しなければならない種々の事項について、現時点において入手可能な情報の調査活動を行ない、A E法の実用化にあたって今後、研究開発が必要な項目を具体化することを目的として調査を行なったものである。調査項目は、以下の5項目に分けて、2章以下にまとめてある。そして、4章には、現時点における文献調査の総括を、5章には、A Eによる材料評価法の一提言を、そして、6章には、今後の研究課題とその進め方についての提言が示されている。又、文献調査の途中、度々、冷却材の流動や沸騰、ルーズパーツ、リーク等の検出を行なうA Eとは近縁技術にあたるAcoustic Signature Analysisの報告にそう過した。これらについても若干ふれている。これは、材料の変質に伴なう本来のA Eとは異なるが、将来、A Eの広範囲な応用を考えるにあたり意味を有するものと考えられる。

調査項目

- (1) 構造材料のA E基本特性
- (2) 変換子、導波棒
- (3) 雑音
- (4) 信号処理法
- (5) 軽水炉およびFBRへの適用例

Ⅱ 文 献 抄 訳

原 文	出典	圧力技術 13(2) 72-79 (1975)	番号	2	頁数	8	写真	1	図表	14
	題 目	配管の疲れ損傷追跡へのAE法の適用 について		著者	仲佐博裕*, 永田敬**		所属	*電力中研, **動燃事業団		
和 文	題 目	同上		抄訳者	仲佐博裕		所属	電力中央研究所	発表月日	年 月 日
	1. 概 要									
<p>動・燃事業団と電力中央研究所との共同研究として、高速炉1次冷却系配管を対象構造物にした曲げ疲れ試験過程のAE諸特性を調べているが、その際のAE技法と代表的なAE適用試験結果を取りまとめている。</p>										
2. 目 的										
<p>高速炉1次冷却系配管の疲れ損傷をAE法で監視する可能性を調べることを目標として、SUS304ステンレス鋼製ベント管、分岐管、ノズルなどの配管要素の疲れ損傷過程を追跡するためのAE法の有用度を評価した。</p>										
3. 内 容										
(1) 配管疲れ試験のためのAE技法										
<p>配管要素の曲げ疲れ試験では、疲れ損傷域は限定されているので、AE波形とその周波数成分、発生率、AE振幅分布、などの諸計測パラメータが解析できるようなAE計測系を使用すると共に、AE変換子の配管径試験への取付けは、高温試験と室温試験の両者に共用できるように導波棒方式を採用している。</p>										
(2) 疲れ試験時のAE諸特性										
<p>a) 疲れき裂が進展し始める試験中期以降になると、ほとんど同一形状のAE信号が、ある一定の荷重レベルで毎サイクル観測されるようになる。通常、その信号は比較的高周波成分が高い。</p>										
<p>b) 疲れき裂の進展時には、繰返し負荷のある応力レベルで集中的なAEの発生が見られると共に、その応力レベルは疲れ試験の経過につれて移動する。このことは試験初期の塑性変形時にはAEの発生が応力の最大となる付近で見られることと対照的である。</p>										
<p>c) AE振幅分布は、疲れき裂の発生時点を境として変化し、試験初期における塑性変形によるAEの高勾配対数直線分布は、疲れき裂の発生後にはその勾配が低下する。</p>										
<p>d) 高温疲れ試験におけるAE特性は、室温の場合に比較して多少異質になる。高温時には、塑性変形に起因するAE信号レベルが上昇すること、カイザー効果が消失すること、などの温度効果のために、疲れき裂の進展に伴うAE信号の強度が相</p>										

この他、AE変換子の取付け方法、ケーブルの炉外への引出し方法、などを検討し諸解決案を提呈している。

(2) Phase AA: BWR配管系の特定溶接部のオンライン監視

限定域のAE監視方式として、応力腐食割れの監視を主題とした空間フィルタを用いるAEシステムの設置を行ない、AE変換子の配置および取付け方法を考案した。予備データ採取過程で生じた計測系および環境ノイズに関する諸問題も明確化した。

(3) Phase B: 材料のAE特性

高温における低サイクル疲労試験、実環境条件下のカイザー効果の存在を調べる回復性能試験、き裂面に形成される酸化層の影響を調べるための酸化試験、およびその破砕試験、の4種の試験計画が計画・検討された。

4. 結 論

オンラインAE監視系は、水圧試験の場合と異なり、AE変換子の取付けと結合方式、ケーブル配線、などの諸点に十分な配慮が必要となる。Dresden炉の経験から、バックグラウンドノイズ環境は、プラント運転中には比較的安定しており、応力腐食割れを検出できる可能性は十分高いものと考えられた。オンラインAE監視法の実用性が本研究プログラムで今後実証されると、その利用価値が極めて大きなものになることがますます明確になった。

5. 主な引用文献

D. E. Delwiche 他: Recirculation Loop Four-inch Bypass Line Cracks (Quad Cities 2 and Dresden 2), NEDC-20669 (GE), Jan. 1975, 他2篇

6. 評価および問題点

現在、Dunegan/Endevco社とNRCとの本研究プログラムにおけるPhase Aは、AE機器設置に伴う経済上の問題から中止となっているが、Phase AAは継続中である。また、Phase BはBNwLに移行され、研究計画もさらに拡大される模様である。今後の本研究方向の進展が期待される。

原	出典	電気学会雑誌 96(4) 282-286 (1976)	番号	3	頁数	5	写真	(3)	図表	8
文	題目	小特集: AEとその応用 V. 原子炉 の監視への応用	著者	仲佐博裕						
			所属	(財)電力中央研究所						
和	題目	同上	抄訳者	仲佐博裕						
			所属	(財)電力中央研究所	発表月日	年	月	日		
1. 概要										
<p>AE法の原子炉監視への適用方向と向題点, 原子炉監視のためのAE諸技法とそれらを利用した実施例, などについて現状をサーベイした。</p>										
2. 目的										
<p>AE法の種々の分野における応用の特集の一環として, 原子力分野におけるAE技術の現状を紹介する。</p>										
3. 内容										
(1) 原子炉監視への適用方向										
<p>圧力バランダリ全系統または特定個所についての運転中連続監視および使用前・使用期間中検査における耐圧試験監視が, 原子力プラントにおけるAE法の主な適用方向であるが, AE技法はほとんどそのまゝの形で, ルーズパーツ監視やリーク検出にも適用できる。また, 原子炉圧力容器の照射ぜい化に対するサーベイランス試験における材質診断への適用方向もある。</p>										
(2) 原子炉監視のためのAE技法										
<p>耐圧試験に比較して連続監視のためのAE技法にとっては, AE変換子の選定と取り付け方法, AE信号の炉外への取出しと信号処理方法, 得られたデータの評価方法, などに高度の技術開発要素が含まれている。とくに, AE検出系は計測上最も苛酷な条件下に置かれると共に, 電気雑音, 機械的誘起雑音, 流体雑音などのバックグラウンドノイズから高S/N比でAE信号のみを検出できる性能が要求される。軽水炉のバックグラウンドノイズレベルの測定結果によれば, 原子炉の各系統はかなり異なる周波数スペクトルを示し, 約300kHz以下では数十から数百マイクロボルトの範囲のノイズレベルの山谷が観測されている。</p>										
(3) 適用例										
<p>米國 Exxon Nuclear 社が実施したPWR圧力バランダリ全系統の使用期間中検査時における水圧試験監視, 米國 Trodyne 社などが実施しているBWR配管系の特定個所のオンライン連続監視, カナダにおける重水炉圧力管のリーク検出,</p>										

対的に低下することになり、疲れ損傷域から離れた個所にAE変換子を取付けた場合には、疲れき裂の進展に起因するAE波が捉えにくくなる。また、上記のような周波数分布やAE振幅分布の疲れき裂発生に伴う変化が不明瞭になる。

(3) ステンレス鋼配管要素の曲げ疲れ試験への適用例

約20体のステンレス鋼配管試験体による曲げ疲れ試験の中から、分岐管550°C高温試験、バンド管室温試験およびレギュレーサ室温試験の3つの実施例について、AE適用試験結果を述べた。いずれの場合も、AEの発生状況を示すAE累積曲線は、試験末期に急増形状を示すこと、AE累積曲線とき裂進展度を示すスニッフゲージ電圧曲線とは強い相関があること、などの実測結果が得られている。

4. 結 論

材料試験片による引張試験などではステンレス鋼はAE活動度が極めて低い材料であるが、構造物試験ではかえって計測の容易なAE信号が得られた。また、疲れき裂の発生は、室温の場合には、AE振幅分布のスペクトル形状の変化やAE信号の発生する繰返し荷重位相の変化、などから検知できると共に、疲れき裂の管厚貫通前の最終段階にはAE活動度の急増が常に観測されるので、疲れ破断の予知は定性的に十分可能である。

5. 主な引用文献

動燃・電中研共同研究報告、「発音検出法による高速増殖炉1次ナトリウム冷却系配管の疲れ損傷過程の追跡法」(才一報) J 256 73-02, CRIEPI-72001 (1973), 同(才二報) J 256 74-03, CRIEPI-74002 (1974), ほか1篇

6. 評価および問題点

原	出典	不 明	番号	12	頁数	29	写真	0	図表	2
文	題	炉心流路の閉塞にともなう	著者	西 原 英 晃						
	目	冷却材異常沸騰の診断法について	所属	京 都 大 学						
和	題		抄訳者	有 井 満 (代理上杉信夫)						
			所属	東京芝浦電気社	発表月日	年	月	日		
1. 概 要										
<p>高速炉の燃料チャンネル入口の異常閉塞時における冷却材の沸騰は、発生した場合には早期にこれを検出する必要がある。本文献は、冷却材沸騰の異常診断法に関する諸外国の文献調査結果と米国の研究者と討議して得られたこの分野の現状と将来の展望について述べている。</p>										
2. 目 的										
<p>プラントへの応用を究極の目標として調査したものであり、主として炉雑音(中性子雑音, 音響雑音など)解析の手法を用いた沸騰検出法に重点が置かれている。</p>										
3. 内 容										
<p>沸騰検出に利用される炉雑音としては、中性子雑音, 音響雑音, 温度雑音などがある。</p> <p><u>中性子雑音を用いる方法</u></p> <p>これは、炉内の中性子密度のゆらぎを解析して冷却材中の気泡を検出するもので1950年代から考えられている。この方法による沸騰開始を検出することはバックグラウンドが大きいのでは困難である。</p> <p>ガンマ雑音を用いる方法も考えられるが、沸騰検出に直接利用した例は見あたらないようである。</p> <p><u>温度雑音を用いる方法</u></p> <p>炉内流路の閉塞によって冷却材が沸騰する前に流速の変化によって温度ゆらぎが異なること、また沸騰による液体の過熱や気泡による擾乱にともなう、大きな温度ゆらぎが期待される。この現象を利用する方法である。</p> <p>沸騰開始による温度ゆらぎは非常に微弱でバックグラウンドから十分分離できず、加熱面と熱電対の距離や熱電対の種類によっても信号が変化するものでPSDによって沸騰を弁別するのは困難である。また、検出チャンネルの数が膨大になることも問題である。</p> <p><u>音響雑音を用いる方法</u></p> <p>この方法は沸騰検出に用いられる最も有効な方法の一つであると考えられている。</p>										

- 音響雑音法を用いた原子炉の例 ---- 英国の PFR と DFR。米国の ORR と EBR II。
- 沸とう音響とバックグラウンド ---- バックグラウンド源としては、機械振動に伴う音、冷却材の流動音、キャビテーションによる雑音、構造材の組織弛化にもなる発生音、などがあるが、キャビテーション音を沸とう音と区別することは必ずしも難しい。しかし、バックグラウンドのレベルが低い時は他の方法と比較して感度が高い。
- 音響雑音の検出器 ---- 問題は、温度、放射線、ナトリウムによる腐食である。ウエーブガイド法とナトリウム中直浸式検出器の二種類ある。
- 音響法の諸問題 ---- ・ポンプからのキャビテーション雑音の分離。その対策として、PSDを丹念に調べ信号を読みとる方法と音源の位置を特定する方法がある。

4. 結 論

冷却材の異常沸とうの検出法について調査してみると、音響雑音法は応用範囲も広く、将来プラントへの応用の可能性が高い方法であるとわされている。しかし、ただ一つの方法に固執することなく原子炉で得られる種々の情報を組み合わせる最適な検出システムを開発する必要があろう。

5. 主な引用文献

1. 中性子雑音に関するもの ---- 18件
2. 温度雑音に関するもの ---- 4件
3. 音響雑音に関するもの ---- 54件

6. 評価および問題点

冷却材の沸とう検出に関して、センサおよびそのシステムの文献がよく調査され、まとめられているのでこの研究分野での参考文献として非常に役立つと思われる。

原文	出典	J. of Acoustical Society of America Vol 53 No. 6		番号	13	頁数	5	写真	—	図表	5
	題目	Background Noise for Acoustic Emission in a Boiling Water and Pressurized Water nuclear Reactor		著者	S.P. Yung, J.E. Kimbitt and C.E. Scott						
和文	題目	BWRおよびPWRにおけるアコースティックエミッションに対する背景雑音		抄訳者	中村哲男						
	所属	三菱重工業(株)		発表月日	年	月	日				
<p>1. 概要</p> <p>BWRでの周波数0~700 KHzの音響雑音スペクトルを正規化して、PWR雑音データと比較した。500 KHz近辺がAEにとって感度の深い周波数領域で、この付近でPWRの流れによる雑音は0 dB (セリサ出力10 mV)で、BWRの雑音は0~15 dBである。AE信号は0~20 dBであるから、PWRの背景雑音にかき消してしまうことはない。BWRでは場所により信号がかくれ、場所により観測可能。</p> <p>2. 目的</p> <p>運転中の原子炉圧力容器のオンラインAE監視技術またはAEによる微小検出システムの開発には炉容器の音響的背景雑音を研究し、このことが重要である。</p> <p>BWRの背景雑音を計測し、既にHutton氏により計測解析されているPWRの背景雑音と比較し、BWRでのAE計測の適用性について検討した。</p> <p>3. 内容</p> <p>3.1. 音響雑音計測について</p> <p>音響雑音計測は炉の乾壓側の配管システムとロッド駆動構造に6個のAEセンサを取付けて実施された(図1)</p> <p>トランスデューサは304ステンレス鋼の段付棒にPZT円盤をマウントし、配管径に沿うよう加工したものが使用された。高効率信号伝送のため3Mの入力インピーダンス増幅器と出力インピーダンスのインピーダンスカップラを用いた。伝送線路は誘導ノイズを減少させるため同軸ケーブルが使用された。周波数解析器は100 Hz ~ 700 KHzまで可能、CRT表示はNo.1 ~ No.5 セリサで10 mV/div. No.6は100 mV/div.。インピーダンスカップラはB&Kのモデル2623。アンプはHP 465A。</p> <p>3.2. 校正について</p> <p>2個の校正用ディスクと1個のセリサディスクの1個を励起して同心上の他の1個とセリサの出力を比較して行われた。セリサの周波数特性を$h(\nu)$、ディスクの周波数特性を$g(\nu)$、出力はそれぞれ$h(\nu)g(\nu)$と$g(\nu)^2$とに比較し、$h(\nu)$を校正基準として360 KHzでの平均部に正規化して、電圧値10 mVを0 dBとした。これは音圧0.1 Paに相当する。</p> <p>3.3. 計測結果</p> <p>BWRの計測結果を図2、図3に示す、PWRの計測結果を図4に示す。</p>											

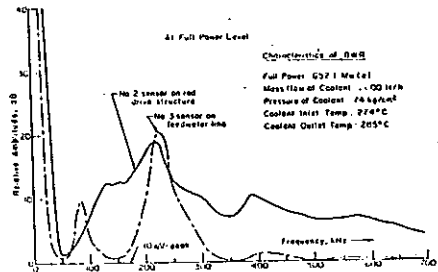
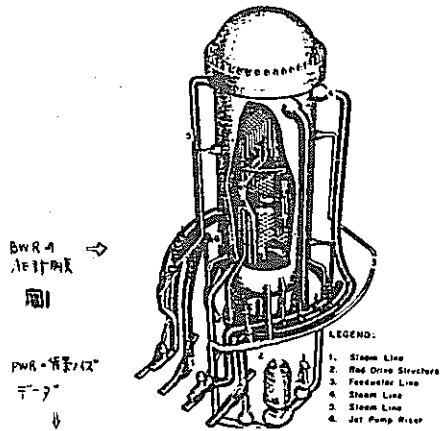
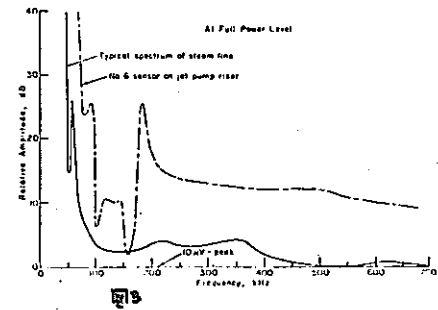
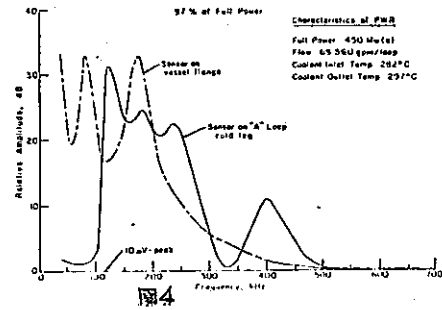


図2
↑
BWRの背景ノイズ
↓



4. 結論

BWRの背景雑音は場所により差がありAE計測の適否を下表に示す。

計測員	計測結果要旨	原因	AE計測の適否
No.1. 蒸気配管	100kHz以上のノイズレベルが小さい。	蒸気は音響伝達が悪い。	適当
No.2. ドット駆動機構を通じた伝音雑音	200kHz近辺で20dB、それ以上では120dB近くある。	水と管との摩擦音や容器内部の雑音は大きい。(特にポンプと乱流)	不適当
No.3. 水供給配管	200kHz近辺で20dB (但し300kHz以上は小さい)。	配管内の乱流や水の流れによるノイズのシフトノイズ。	周波数領域を選択すれば可能
No.4. 蒸気配管	100kHz以上のノイズレベルが小さい。	No.1 同様	適当
No.5. 蒸気配管	100kHz以上のノイズレベルが小さい。	No.1 同様	適当
No.6. シェットポンプ	100kHz近辺のノイズ大、190kHzで25dB、200kHz以上では15dB	伝音機構ノイズ大、ポンプ駆動ノイズ	不適当

5. 主な引用文献

- (1) "Acoustic Emission from Irradiated Steels" by AG Pickert, etc. 米口和日非破壊検査協会誌, April 1971
- (2) "Performance of Noise Analysis Study" by PH Hutton. Edison Electric Institute Project RP790105/44雑音 (28 May 1971)
- (3) "Feasibility Study for Acoustic Leak Detection System for Nuclear Steam Supply Systems" ADPA-274 (Sept. 1971)

6. 評価および問題点

- (1) 運転中の背景雑音レベル、周波数特性が得られたことは、原子力プラントのAEモニタリングを進める上で重要な事項であり、高く評価されるものがある。
- (2) AE信号レベルについては引用文献(1)から20dB程度と想定しているが、一概にこの数値に拘束してよいかどうか、現在も進められている各種検討を加味して、認定する必要があるのではないかと考える。

原 文	出典	ASTM-STP 571	番号	14	頁数	29	写真		図表	20
	題 目	Acoustic Emission in the Frequency Domain.		著者	Graham, L.J., Alers, G.A.					
和 文	題 目	周波数領域におけるアコースティック エミッション		抄訳者	中島 玉雄					
				所属	石川島播磨重工業	発表月日	年	月	日	
1. 概 要										
<p>ビデオテープレコーダとスペクトル分析器を用いて、AE信号の広範囲な周波数成分を求める方法が開発された。この周波数成分はAE発生メカニズムに関連し、試験片寸法や構造物への多重反射によるモード変換にあまり影響を受けないことが実験によって示された。種々の構造物におけるAE信号伝播特性も測定した。</p>										
2. 目 的										
<p>本研究の目的は、AE信号の周波数成分を測定することにより、靱位運動や亀裂の進展などのAE発生源メカニズムの確認と、その動作に関連する物理的パラメータを求めることとあり、また、AE信号とその他の外音雑音とを分離する方法を開発することである。</p>										
3. 内 容										
<p>本研究は数多くの異なる試験条件におけるAE信号の周波数成分を求め、ビデオテープレコーダとスペクトル分析器を用いて、過去2年間以上かけて実施された。本研究で実施した主な試験項目を下記に示す。</p>										
<p>1) 引張試験： A533B 圧力容器用鋼</p>										
<p>2) 疲労試験： 2219-T87 アルミ板 (1.2m x 1.2m x 6.3mmt) 中央ノッチ付 (1.8m x 0.3m x 1.6mmt) 2024-T851 アルミ棒 (5mmφ x 100mmL)</p>										
<p>3) 曲げ試験： アルミナ・セラミック杆, 3点曲げ</p>										
<p>4) 音響伝播試験： 大型ガス圧力容器 (内径1.2mφ x 12mL x 125mmt) A283 および A212-B, A105 杆製 低圧液体貯蔵タンク (保冷材付) 2219 アルミ製 ボールベアリング軸受装置。</p>										
<p>上記試験により下記の考察が得られた。</p>										
<p>1) 試験片の共振が起る低周波数領域以外では、AE信号の周波数成分は試験片の形状・寸法によってあまり変化しない。</p>										
<p>2) 大型構造物におけるAE信号の持続時間は、実験室での小型試験片のそれより短くなる。これは大型構造物では共振現象が起らないためである。</p>										
<p>3) AE発生源と検出器との距離が大きくなると、AE信号の持続時間も長くなる。しかし、周波数スペクトラムは変化しない。(板厚6.3mmアルミ板の場合)</p>										

- 4) 試験機の油圧装置からの雑音は300~500kHzまで強い周波数成分を有し、衝撃などによる機械的雑音は200kHz以下の周波数成分を有する。
- 5) 大型圧力容器外面の長さ方向に沿ったAE信号減衰量は、ウェーブガイド効果により1.5m以上では一定となる。
- 6) 構造物表面の塗料や保温材などのダンピング材料はAE信号の伝播を遅くする。
- 7) もし、グリースまたは油膜による音響的結合が可能であれば、ベアリング軸受などを介しての回転機械のAEによる監視も可能であろう。
- 8) AE信号の波長より小さな板厚の板材など、分散を生ずる媒質においては、AE信号の各周波数成分は異なる速度で伝播し、ある距離を進むと各周波数成分が空間的に分離し、検出器へは時間的にずれて到達する。

4. 結 論

過去2年間にわたる研究から得られた重要な結果を下記に示す。

- 1) AE信号の周波数成分は、構造物の境界面の反射によるモード変換によって本質的に変化しない。
- 2) 観測されるAE信号の周波数スペクトラムは、音響減衰の周波数依存性とAE発生源と検出器間の伝達媒質の分散特性の両方によって変化する。
- 3) 多くの材料のAE信号は、少なくとも2MHzまではほぼホワイトノイズとなる傾向にあるが、周波数スペクトルに特徴のあるケースがいくつか観測された。
- 4) 周波数スペクトルの違いによって、外部雑音と欠陥からのAE信号とを度々区別することができた。

5. 主な引用文献

Graham, L. J. "Frequency Response Characteristics of Acoustic Emission System Components" SCTR-73-6, (March 1973) Science Center, Rockwell International, Thousand Oaks, Calif.

6. 評価および問題点

著者等の過去2年余にわたる研究の成果をまとめられたものもあり、特徴ある周波数スペクトルを示す例も紹介されているが、実験条件などによって変化するものも考えられ、またAE発生源とその周波数成分との関連づけもなされている。

原 文	出典	NUCLEAR SAFETY Vol.17, No.1 1976	番号	15	頁数	10	写真		図表	2
	題 目	Acoustic Emission : A Critical Assessment		著者	K.E. Stahlkopf and Gary J. Dant					
和 文	題 目	アコースティック-エミッション： 批判的評価		抄訳者	藤沢和夫					
				所属	住友金属工業(株)	発表月日		年	月	日
<p>1. 概 要</p> <p>これまでに行なわれたAE研究を調査することにより、現在のAE技術の限界を概説する。その調査結果によれば、AEは異常なでき事及びその位置を示すことはできるが、異常なでき事が何であることも示すことはできないことがわかる。又今後AE技術を成長させるために行なわねばならない研究項目についても述べる。</p> <p>2. 目 的 前に行なわれた研究の文献調査により、静水圧試験時の監視及び圧力容器等の連続監視に使用される現状のAE技術の限界を概説する。また将来の研究及び開発のために必要な項目を述べる。</p> <p>3. 内 容</p> <p>現在のAE技術の受けとられ方は使用者の立場により異なっている。たとえば設計者にとっては大きさとか種類といった欠陥の特性を与えられないことは失望的であるが、材料変形研究者にとっては非常に有益な手段を与えている。そこで現状のAE技術の限界を知ることは重要である。文献調査よりわかるAEの限界は以下の通りである。</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 大規模構造物の監視中受信されるAEの発生機構を明らかにできない。 2. 材料特性の変化とAEとの直接の関連性は確立されていない。たとえば静水圧試験において最もAE活動が大なる欠陥が重大とは限らない。又疲労試験において欠陥進展とAEとの関係がないという結果も得られている。 3. カイザ効果とその回復という問題をとも、完全には理解されていない。 <p>このような限界があるが、次のような有益な結果も報告されている。</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 静水圧試験時のAE発生場所とNDT(UT等)による確認結果はよく一致している。 2. オンライン監視は経験がまだ不足しているが、ウェーブガイド法の開発や発生源の計算の情報処理システムや信号の選択機能の開発とかをもたらしめた。 										

4. 結 論

AEは価値ある非破壊検査法となる将来性をもっているが、その限界についても理解して使用しなければならぬ。つまり現状ではAEは多分異常なでき事及びその位置を明らかにできるが、そのでき事そのものを明らかにすることはできない。そして今後よりいっそうの研究を要する分野は次のものである。

1. 割れ進展と関連するAE特性の研究
2. 割れ破面の摩擦がいかん信号に影響するかの研究
3. 種々のAE発生源を区別できる方法を開発するためのAE発生メカニズムの物理的過程を明らかにするための研究
4. センサ校正の標準的な方法の開発
5. 母材部と溶接部と独立に監視する手法の開発
6. カイザ効果抑制の度合と信号回復に必要な条件

5. 主な引用文献

本論文の性格上非常に多く代表的なものは上げられない。(2件)

6. 評価および問題点

原	出典	J. Acous. Soc. Amer. 49 (5-1) 1393~1396	番号	16	頁数	4	写真		図表	4
文	題	Significant Audible Noise from		著者	S.P. Ying and C.C. Scott					
	目	Sodium-Water Reactions		所属						
和	題	ナトリウム-水反応で生ずる特徴的な		抄訳者	佐々木 荘二					
	目	可聴域雑音		所属	(株) 日工製作所	発表月日		年	月	日
<p>1. 概要 Na-水反応の際に生ずる音響スペクトルを室温と315°Cの2種の温度で観測した結果を述べている。水素バブルの励振によって生ずる可聴音は1.5 KHz以下、Na-水の境界で生ずる frying noise は2 KHzの付近にピークがある。</p> <p>水素バブル音の周波数と対数減衰率は、理論的推定結果と一致し、2 KHz付近にピークをもつ frying noise は水-Naの化学反応熱による膨脹圧に基づく。</p>										
<p>2. 目的 Naを冷却材として用いる原子炉の蒸気発生器にリークが生じた場合、これを即座に検出して適切な対策を講ずるために、Na-水反応で生ずる音響の特徴点を周波数スペクトルの観点から調べ、リークの瞬間検出手段を開発するための基礎データを得ることを目的としている。</p>										
<p>3. 内容 Na-水反応の実験を室温と315°Cの温度で行なった。</p> <ul style="list-style-type: none"> 室温の実験：少量のNaを水の表面におくか又は浸漬して反応時の物理的挙動を観測した。検出器には圧電トランスジューサーを用い、音響スペクトラムは磁気テープと入ペクトル分析器、アバレージャを通して得た。水面でのNa小片(直径1/4 in)は化学反応熱で frying noise を出し、このノイズは2 KHz付近に入ペクトラムのピークがある。水中でのNa小片は500 KHzのところにも一層強いピークのあるノイズを出す。これは水素バブルの減衰振動による。 315°Cの実験：トランスジューサーはスチール棒を介して容器壁に取り付け、315°CのNaを入れた容器にはアルゴンのカバーガスを封入している。液体Na中への水の注入は0.025 in²のオリフィスを通して2600 psiaのNaガスの圧力で行なった。水滴が液体Naの面に落ちると frying noise が発生する。液体Na中に水を注入するとNa中の水素バブルは800 Hz付近にピークのある励振音を出す。 バブル振動の理論：ガスバブルの振動は圧縮性流体中の気泡の自由振動について、線形理論による方法と、圧カパルスが液体に加えられたときの表面張力による効果を考慮した数値計算による方法とで、固有振動数と対数減衰率が求められた。例えば、315°C 1 atmの条件で両者の方法で得たバブル振動周波数は一致がみられた。 検討：室温でのNa-水反応による水素バブルの半径はほぼ1/4 inであり、これから1 atmの水中での理論的振動数は$f = 516 \text{ Hz}$で実験結果の500 Hzとよく一致した。対数減衰率も$\delta = 0.043$なる理論的予測と実験値とはよく一致した。 <p>液体Na中の水素バブルのサイズを室温でのNa-水反応の実験結果を基にして、水</p>										

素, 水, Naのうちの2成分系の拡散, 拡散終了時の3成分分子の個数密度比および水素ガス分圧の考慮から推定し, 結局315°CでのNa中のバブルの振動数の実測値800 Hz に対し, 計算値は850 Hz とほぼ期待した結果が得られている。

Na-水反応時の frying noise の発生メカニズムは, 室温の場合とNa温度315°Cの場合とほぼ類似していて2 kHz付近でのノイズは, 両者同様の傾向になっている。

4. 結 論

- Na-水反応時に発生する音には frying noise と水素バブルの振動音の2種があり, それぞれ周波数スペクトラムに特徴がある。
- frying noise は室温でも315°Cの温度でもほぼ同様に2 kHz 付近に主成分をもつスペクトラムを示す。
- 室温の1 atmの水中のバブル振動音は約500 Hz付近に, また315°CのNa中のバブル振動音は約800 Hz 付近にピークがある。
- 上記の結果は実験的理論的に裏付けられ, Na-水反応を音響的手段で検知することによりFBRにおける蒸気発生器の異常を監視することは有望な方法といえる。

5. 主な引用文献

- 1) E. H. Kennard, "Radial Motion of Water Surrounding a Sphere of Gas in Relation to Pressure Waves," David Taylor Model Basin Rep. No. 517, 1-38 (Sept. 43)
- 2) S. H. Woo et al., J. Acoust. Soc. Amer. 42 114~120 (1967).

6. 評価および問題点

原	出典	Acustica Vol. 24, Heft 3 (1971)	番号	17	頁数	1-111 -P.125	写真		図表	10
文	題	The Use of Mechanical Waveguides		著者	B. Woodward					
	目	for Sound Detection in Resonant Vessels		所属	Dept. of Physics, Imperial College of Science and Technology, London					
和	題	共振する容器中の音響検出のための		抄訳者	渡辺 哲夫					
	目	機械的導波棒の使用について		所属	物日本製鉄株式会社	発表月日		年	月	日

1. 概要

水を満たされた円筒状容器の中の音源からの圧力波を、その水中に棒状 wave guide を挿入し、他端に accelerometer をとりつけた装置を用いて検出する場合の諸問題を実験的に調査したものである。

2. 目的

稼働中の FBR に於ける高温の液体 Na の音響学的性質は、常温に於ける水に非常に違い、FBR の内部の異常音響の発生をその内部の液体 Na 中に挿入した wave guide を用いて計測する装置を開発するのに必要な基礎データを得るために、常温の水を用いて模擬実験を行った。

3. 内容

壁厚の比較的薄い容器に水が満たされている振動系に於ては、種々の固有振動数に対して夫、特有の定常波が内部に発生するような振動モードが存在し、夫、のモード毎に容器内の圧力変化の分布が明瞭に異なる。その分布の状況は円筒状容器の場合、軸方向には正弦波函数、半径方向には Bessel 函数で表はされる分布となる。

このような圧力変化の分布状況が、実験容器(半径 50 cm, 深さ 120 cm)に於てその

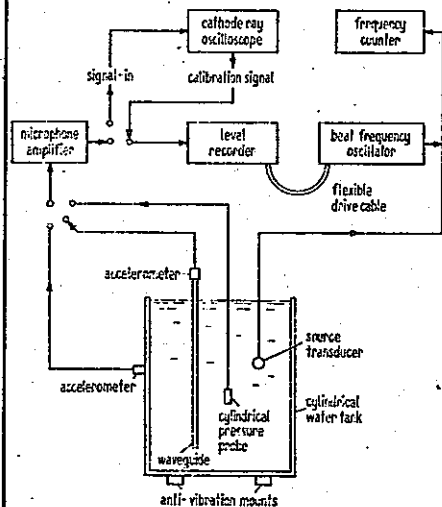


Fig. 2. Diagrammatic plan of apparatus.

中心に音源用変換子を置き、その駆動周波数の種々の値に対して容器内各部の圧力変化の振巾値を圧力検出用 probe を動かして計測し、いくつもの共振周波数に於て定常的な山と谷を有する特徴のある分布が実測された (Fig. 2, Fig. 5)。

更に音源と probe の位置を互に入替えても圧力変化の計測値は変わらない。即ち reciprocal な位置関係にあることも実験的に確認された。

次いで棒状 wave guide の先端を前述の probe 位置と同一位置に挿入して(他端には accelero-

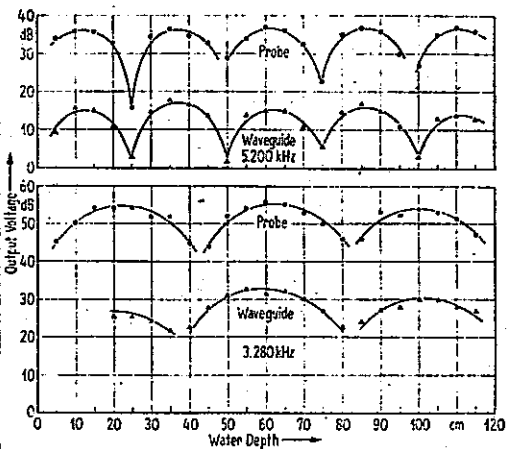


Fig. 5. z-variation of probe and waveguide response. (dB re 10 μV.)

-meter 取付) 計測した結果、受信感度はほぼ 20~25 dB 低下はするが、圧力変化の分布曲線は殆んど同一のものが得られた (Fig 5)。

Wave guide の直径は 大きくすれば幾分かは応答がよくなるようだが、それほど顕著な影響はない。しかしながら wave guide の長さは受信圧力変化の周波数が guide の長さ方向の共振周波数と一致した時は 非常に鋭い共振特性を示し共鳴状態になることも分った (Fig 7)。

なほ棒状 wave guide の端面の位置のやが圧力変化検出に寄与し、棒の側面 (円筒面) へ伝く圧力変化は 線合すると端面に伝く力と反対に伝いて

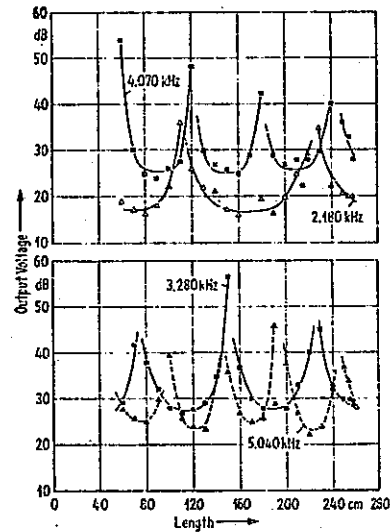


Fig. 7. Variation of response with waveguide length. (dB re 10 μ V.)

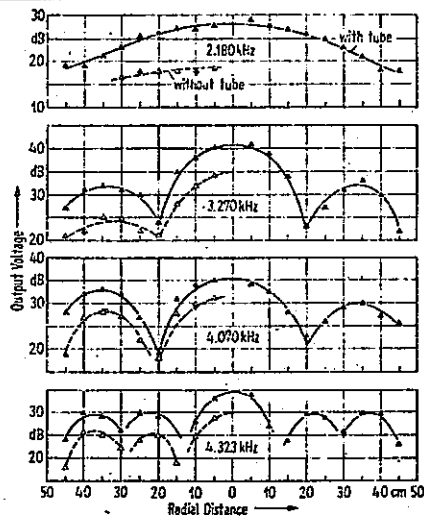


Fig. 9. Effect of pressure on end face of rod along diametrical line: ($z=60$ cm, $\theta=0^\circ$ to 180°). (dB re 10 μ V.)

いるようである。この事実 は wave guide を円筒及び端部のゴムシール

でとりかこみ、guide の端面のみを水に接触させるようにして計測すると、裸の wave guide の場合に比して受信感度が 5~10 dB 上昇する結果が得られた実験によって確認された (Fig 9)。

5. 主な引用文献 --- Morse, P.M. ; Vibration and Sound. McGraw Hill, N.Y. 1948 他
 関連文献 --- Woodward, B. & Stephens, R.W.B. ; Some aspects of boiling noise detection in sodium reactors by means of a mechanical waveguide. ULTRASONICS, Jan. '71, p21~25.

6. 評価および問題点

原文	出典	Acoustic Emission, ASTM STP 505, 1972		番号	18	頁数	20	写真	2	図表	12
	題目	Detecting Acoustic Emission in Large Liquid Metal Cooled Fast Breeder Reactors		著者	Anderson, T. T., Garin, A. P., Price, C. C., Karvonen, J. R., Reiman, K. J.						
和文	題目	大型LMFBRにおけるAE検出		所属	Argonne National Laboratory						
				抄訳者	藤岡 芳朗						
				所属	川崎重工業(株)	発表月日	年	月	日		
<p>1. 概要 LMFBR音響監視システムとして、観測される現象の大部分はAEであり、その検出方法として、高温用変換子か導波棒による方法が挙げられるが前者を採り上げ、ここではその紹介、実用性、信頼性などの検討、試験の経過を報告し、またEBR-IIにおいての、加速度計を用いた各種音響監視、診断の事例について報告するものである。</p>											
<p>2. 目的</p> <p>LMFBR開発計画の一環としての、音響的手法による。</p> <p>(1) 炉心と動力設備構成材の監視、</p> <p>(2) 液体ナトリウム沸騰音の検出</p> <p>(3) 高温物体のAE検査法確立 など。</p>											
<p>3. 内容</p> <p><u>序文</u> — 音響監視により、LMFBRの運転条件と建造物中に用いられる材料の挙動がわかるが、それらは短い持続時間の事象によって発生するものであるから大部分がAEである。英国のDFRでは導波棒と加速度計により、Na-Kの沸騰などが監視され、また三角測量法により異常個所の位置決めも行なわれているが、当研究所においてもAEによる監視と応用展開についての研究がなされている。</p> <p><u>音響検出方法および音響導波棒</u> — 従来の変換子は高温用として不適当で、そのため変換子を冷却する方法は、Na中の不純物析出などより不都合である。また導波器による方法は、感度の低下と周波数特性の劣化を免れない、なお管による導波は、径方向の共鳴とたわみ共鳴の結果、導波管自身がバンドパスフィルターの役目をする。また針金の束は柔軟性を持たし得ると共に、高域周波数特性の改善が計り得る。</p> <p><u>高温用変換子</u> — 広帯域周波数特性と高感度という点からは、変換子をナトリウム中に浸漬すべきで、その場合は高温(650℃)と強い放射線下において、安定でしかも高信頼性を確保しなければならない。試作したリチウム・ニオベートを用いた変換子は、高速中性子と高温ナトリウム中での試験が未実施であるが概ね良好な結果を得ている。</p> <p><u>ステンレス鋼昇温疲労試験時のAE</u> — Zカットのリチウム・ニオベートを用いた変換子を装着した、ステンレス鋼試験棒の熱疲労(427℃)、くり返し応力(0.1 Hz)中のAE計測を開始した。加熱、冷却による変換子構成材の熱膨</p>											

張差などによるノイズ，引張り試験機などによるノイズ究明と対策を終え，予備計測を実施した段階である。用いた試作変換子の感度は -110dB 程度(1M Hz ， $1\text{V}/\mu\text{bar}$)であった。

沸騰音の検出 — FBR炉心中の沸騰は，冷却剤の温度変化，中性子検出および音響検出などによる検出手法があるが，応答速度，感度，識別の点から音響的検出方法が優れており，フェニックス炉，DFRなどで確認されている。

大型ナトリウムシステムの音響監視，騒音による原子炉の診断 — EBR-IIの一次側Na系，CCTLでの試験(520°C ， Na)，およびEBR-II二次側Na系の加速度計による，音響監視の事例の詳細な紹介と報告を行なった。またそれらにより，音響監視の有効性が確認された。

4. 結 論

音響的モニタリングを液体金属冷却システムに適用すれば，原子力プラントの運転並びに補修に関して，各種の情報が得られることを明らかにした。またさらに，当アルゴン国立研究所では，LMFBRプラント内のナトリウムの挙動，および高温下における直接モニタリング用の技術と装置(リチウム・ニオベートを用いたAE検出用変換子など)を開発中であり，これらの装置をモニタリングに応用すれば，液体ナトリウム・システムにおける音響発生位置の監視およびAE計測が可能となるであろう。

5. 主な引用文献

James, L.C., *Nuclear Engineering*, NUCEB, Vol.10, Jan, 1965.

Van Exp, J.B., Macfarlane, D.R., Fauske, H.K., *Nuclear Engineering and Design*, Vol.15, 1971, 他41件引用

6. 評価および問題点

EBR-IIにおける，流量に関する雑音，ナトリウム酸化物による異常音，熱交換器ドレン管の固定具異常による振動音，といった異常音検出の実績については詳述されているが，AEに関しては，リチウム・ニオベートを用いた高温用変換子の試作状況と，その耐熱，耐放射線などの検討，試験についての経過報告，試作した変換子を装着したステンレス鋼の昇温疲労試験(427°C ， 0.1 Hz)における，AE計測の初期段階の報告であり，それらに対するその後の報告(続報)に期待するところが大きい。

原文	出典	materials evaluation		番号	19	頁数	8	写真	4	図表	5
	題目	Acoustic Emission Transducer Calibrator		著者	Walter C. Leschek						
和文	題目	AEトランスジューサーの較正法		所属	Westinghouse Research Laboratories.						
				抄訳者	石原 耕司						
				所属	日本鋼管(株)	発表月日		年	月	日	
1. 概要											
<p>拡散音場において、標準トランスジューサー出力とAEトランスジューサー出力を比較することにより、AEトランスジューサーの較正感度を得た。</p> <p>標準トランスジューサーの較正は独立に相互較正法により行われた。</p>											
2. 目的											
原子炉圧力容器を対象とするAEトランスジューサーの較正法の研究											
3. 内容											
<p>標準として使用したトランスジューサーは振動子にLi_2SO_4結晶を用いて作る。振動子の共振周波数は10MHzであり、またこの振動子のQ値は低い。これを周波数範囲100kHz～1.1MHzの範囲で使用した。</p> <p>このトランスジューサーを水および鋼製のテストブロックを用いて相互較正法により縦波に対する感度の較正を行った。この較正法の利点は、トランスジューサー間隔、媒体密度の他に種々の電気量の測定を行えば較正が出来る点にある。</p> <p>Mattaのデータをもとにした計算結果と実験値はよく一致しており、$1\text{V}/\mu\text{bar}$を基準として-124dBであった。</p> <p>このようにして較正された標準トランスジューサーとAEトランスジューサーを用い、ランダムノイズを音源として用い、スペクトラムアナライザーで周波数応答を測定する方法により、両センサー間の比較および較正を行った。</p> <p>この時用いたテストブロックは次の真に留意して作られている。</p> <ol style="list-style-type: none"> 1) 原子炉圧力容器の厚さに近い事。 2) ブロックの共振により較正結果があいまいにならない事。 3) 較正結果が、原子炉の背景ノイズを供って実器で行われた相対的較正結果と一致すること。 <p>テストブロックは残響室と似た働きをするように作られている。即ち密な機械的共振系をもち、ブロック内の音場が一様拡散場であることである。この目的のために軸比が1:2$\frac{1}{2}$:4$\frac{1}{2}$になればよいことが経験的に知られており、ブロック</p>											

は $25.4 \times 20.2 \times 16.0 \text{ cm}^3$ の直方体状に作られている。このテストブロックを用いた場合、テストブロック上のトランスジューサー位置が較正結果におよぼす影響は $\pm 1 \text{ dB}$ 以内に入っており、位置の影響は少ない。

このようにして較正された結果では AE トランスジューサーの感度は高く、例えば 500 kHz では標準トランスジューサーと同一単位で表示する場合、標準トランスジューサーより 31 dB 高かった。

標準トランスジューサーの較正は、厳密には縦、横波をふくむ拡散音場中でおこなわれるべきである。また AE トランスジューサーが音圧、動的応力あるいは加速度のどれにセンシティブなのかはわかりしっていない。これはブロック内の縦、横波のノーマルモードの分布に関する研究とともに今後の研究課題である。

4. 結 論

ランダムノイズを音源とし、スペクトラムアナライザーで周波数応答を測定する方法によれば AE トランスジューサーは標準トランスジューサーに比べ感度が高いことがわかった。しかしこの方法では AE トランスジューサーが音圧、動的応力あるいは加速度のどれにセンシティブなのかはわからない。これはこの方法の欠点である。

標準トランスジューサーは縦、横波をふくむ拡散音場中で較正されるべきである。これに関連し、テストブロック内の縦、横波のノーマルモードの分布の研究も必要である。

5. 主な引用文献

C. M. Harris and C. E. Crede, *Shock and Vibration Handbook*, 1961, McGraw-Hill, New York.

O. E. Mattiat, *Ultrasonic Transducer Materials*, 1991, p. 91, Plenum Press, New York.

6. 評価および問題点

原文	出典	Journal of Nuclear Energy Vol. 25	番号	20	頁数	14	写真	0	図表	9
	題目	THE DETECTION OF BOILING IN NUCLEAR REACTORS		著者	R. F. SAXE et. al.					
和文	題目	原子炉の沸とう検出		抄訳者	有井 満(代理上杉信夫)					
				所属	North Carolina State University					
				所属	東京電力電機	発表月日		年	月	日
<p>1. 概要</p> <p>原子炉の沸とう検出法の二つの方法—中性子束測法と音響法—について感度の比較を行った。実験の結果から、バックグラウンドの低い理想的な場合には、音響法の感度は中性子束測法に比べて少なくとも 10^3 から 10^4 倍であることがわかった。</p>										
<p>2. 目的</p> <p>実験によって、これら二つの方法の相対感度を評価することにある。そこで、ノースカロライナ州の大学の小さい炉(最大パワー 10kW)で測定を行った。</p>										
<p>3. 内容</p> <p>1. 中性子束測法</p> <p>1) 測定項目 (1) 原子炉のパワースペクトル密度の特定の周波数に表われるピーク。</p> <p>2) 測定方法。パワースペクトル密度は、50 Hz から 0.01 Hz の周波数領域をカバーする相関器を製作し、デジタルコンピュータを用いて計算して求めた。使用した中性子検出器は、Reuter-Stokes RSN-1SA イオンチャンバーである。</p> <p>2. 音響測定</p> <p>1) 測定項目、(1) 周波数スペクトル測定</p> <p>(2) 広帯域振動測定</p> <p>2) 測定方法、マイクロホンの出力をウエーブアナライザで分析し、スペクトルを X-Y 記録計に記録した。広帯域の振動は、3 kHz ~ 20 kHz のバンドパスフィルタをかけ、整流・積分した値をカウント数に変換して測定した。使用したマイクロホンは、感度 $-96 (\pm 2) \text{ dB}$ ($0 \text{ dB} = 1 \text{ V}/\mu\text{bar}$)、帯域 1 Hz ~ 20 kHz の特性をもつものである。</p> <p>3. 沸とう発生器</p> <p>沸とうは、直径 1.25 cm、長さ 10 cm のヘリカル状に巻かれたニクロムロータに、A.C. 電流を通して発生させた。</p> <p>4. 実験結果</p> <p>1) 中性子束測法</p>										

(1) パワ-密度分布 (0.5 Hz ~ 30 Hz) は、余子炉出力 (100, 400, 1000 W) に影響されない。(2) パワ-密度分布は、沸とう (電気ヒータ入カパワ 2870 W) によって影響されない。(3) 実験時の最大の沸とうバブルによる全平均ボイド体積を炉のボイド係数から求めると、0.4 ml 以下であり、小さい値であった。

2) 音響測定

(1) 周波数スペクトルは、沸とうによってレベルが全体的に大きくなる。(2) 沸とうを特徴づけるスペクトルのピークは現われない。(0.5 ~ 30 kHz)。(3) 炉心で発生した沸とう音は、炉心上面まで伝はんすも向に炉心によって約3桁減衰する。(4) バックグラウンドノイズとして、ポンプからのノイズが大きい。(5) 3 kHz ~ 20 kHz の積分値を10秒間のデジタル量として測定した結果、1.7 kW (音源ヒータ) から急増した。

4. 結論

音響法と中性子束雑音法の沸とう検出感度の比 R を定義する。

$$R = \frac{\text{音響法による沸とう検出感度}}{\text{中性子束雑音法による沸とう検出感度}}$$

この比 R を用いて二つの方法の感度を比較すると、バックグラウンドノイズによって異なる。

(1) ポンプノイズのある時 $R = 4 \times 10^4$

(2) ポンプノイズのない時 $R = 4 \times 10^3$

となる。即ち、理想的な状態では、音響法は中性子束雑音法に比べて $10^3 \sim 10^4$ 倍感度が高いことがわかった。

5. 主な引用文献

Roux D.P., Fry D.N. and Robinson J.C. "Application of Gamma-Ray Detection for Reactor Diagnosis," ORNL-TM-2144, (1968)

6. 評価および問題点

この論文の議論は、バックグラウンドノイズの少ない比較的理想状態でのものであるが、実プラントでバックグラウンドノイズが大きくなった時、二つの方法の優劣の差が、どの程度成立するか疑問の点はある。

また、温度条件や静圧条件の差による感度への影響等についても検討する必要があると思われる。

原典	番号	21	頁数	写真	図表
文目	題名	A technique for checking calibration change with temperature for acoustic emission transducers			
	著者				
和文目	題名	温度によるAE探触子の特性変化を検討する技術			
	抄訳者	松本 陽二			
	所属	神戶製鋼所			
	発表月日	年	月	日	

1. 概要

-300°F~1000°Fの温度域で探触子を較正するための装置を試作し、適正なキャリブレーションを行うための条件を種々検討して、これらの温度域での探触子の較正方法を確立した。

2. 目的

現在、探触子の較正方法としては、種々の方法が提唱されているが、いずれも常温付近で利用する方法であるので、ここでは低温から高温に至る広い温度域で採用できる較正方法を確立する。

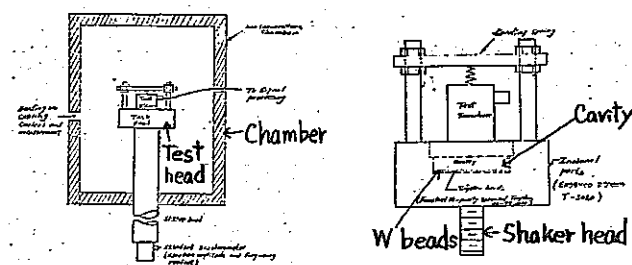
3. 内容

(1) 装置の南発

広い温度域(-300°F~1000°F)で探触子の特性を検討するための装置が満足しなければならぬ条件としては

- (a) 装置を所定の条件下(温度等)にすることが簡単
- (b) 探触子の固定が簡単
- (c) 環境によって音源の強さ、伝達等が影響されない
- (d) 繰り返し可能
- (e) 音源の強さ等が制御可能

が考えられ、これらの条件を満足する装置を南発した。それを図1に示す。同図に示すように、テストヘッドの空間(耐酸化等のため真空)にタングステン玉を入れ、下からのシェーカー・ヘッドを振動することによって音を発生させ、上に設置した探触子でこの音を検出する。計測する温度はチャンバー内で可変である。



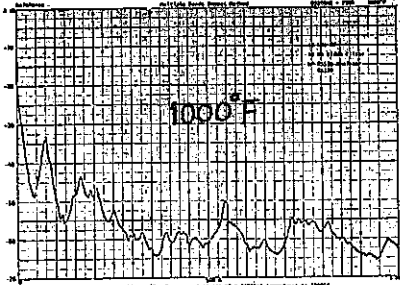
装置説明

- 1) 1-1 コネル600とタングステンで作られている
- 2) タングステン(40~75μm)の衝撃速度等はシェーカー・ヘッドの周波数、振幅と変化することによって制御

図1 Multiple beads impact test

(2) 他の較正法との比較ならびに高温下での計測

常温でスパーク法と較べると、大体同様な結果が得られた。しかしながら探触子の径が犬の時、スパーク法が表面波を検出しているため、高周波域で幾らかの差異が認められた。また装置の再現性、安定性を調べる意味でタングステン玉の大きさ、



シエカーヘッドの振幅、周波数等が探触子の応答性に影響するかどうか検討した。その結果周波数スペクトルの形の変化は認められなかった。このような結果をもとにして高温下で計測した結果を図2に示す。

図2. 1000°FでのD9205M2の周波数特性

4. 結 論

ここで開発した装置を用いる方法 (The bead impact-vibration method) は低温から約1000°Fの高温域にわたってAE探触子の特性変化を検討するのに適していた。なお0.1MHzから1MHzの周波数域の応答はこの装置によって簡単に調べることができる。

5. 主な引用文献

- (1) Tatro, C.A. ASTM STP 505, 1972, P84~99
- (2) Goldsmith, W. Impact, Edward Arnold Ltd, 1960
- (3) Timoshenko, S and Goodier, J.N. Theory of Elasticity, 3rd Edition, Mc Graw-Hill Book Company.

6. 評価および問題点

過去において、温度によるAE探触子の特性変化を検討する技術は余り報告されていなくことより、このような方法を確立しようとした試みに意義があると思われる。

原	出典	EXXON NUCLEAR COMPANY, Inc.	番号	27	頁数	61	写真	2	図表	29
文	題	NOT-Acoustics in-service inspection of Kernkraftwerk Lingen Nuclear Steam Supply System	著者							
和	題	Kernkraftwerk Lingenの原子力蒸気供給システムのAE法による使用期間中検査	所属	EXXON NUCLEAR COMPANY, Inc.						
文	目		抄訳者	羽田 野 南						
			所属	東京工業大学	発表月日	年 月 日				

1. 概 要

西独 Kernkraftwerk Lingenの原子力蒸気供給システムの使用期間中検査にAE法を適用した。軽微なバルブのリークが検出されたものの、重大な欠陥は検出されず、耐圧試験状態で構造上安全であると確認された。

2. 目 的

西独 Kernkraftwerk Lingenの原子力蒸気供給システムの使用期間中検査についてAE法を適用し、その構造的健全性を評価する。

3. 内 容

1975年11月、西独 Kernkraftwerk Lingenにある原子力蒸気供給システムの使用期間中検査にAE法を適用した。耐圧試験がAE検査の対象となつたのは次の通りである。

- テスト1: 原子炉圧力容器、再循環系、蒸気ラインと配管。
- テスト2: 2つの副冷却系の2次側と配管。
- テスト3: 単化システム(復熱交換器、非復熱交換器と配管)と単化フィルタ。

AEの測定には、テスト1では46, テスト2では36, テスト3では22のAE検出器を用いた。また、単位圧力増分当りのAEエネルギーの相対値を求めたため60dBのエネルギー回帰も使用した。

AE試験の結果、標定されたAE原の数、及び3等級分類法で等級1の許用基準に合致したAE原の数は次の通りである。

テスト1:	標定されたAE原	15,	等級1のAE原	6
テスト2:	"	11,	"	8
テスト3:	"	11,	"	1

重大な等級2又は3のAE原の存在は検出されなかった。また、1974年に行つた結果とかならずしも同じ場所からAEが発生した。AE検査中、多数の軽微なバルブのリークが検出されたが、その位置は標定され措置が講じられた。

AEにより、重大な欠陥は検出されず、検査した原子力蒸気供給システムの構造部材は、耐圧試験の状態で構造上安全であると判定された。

4. 結 論

原子力蒸気供給システムについてAE法を用いた試験を行った結果、合計37のAE源が検出、検定を以て解析された。その内、15のAE源が、等級1の評価基準に合致した。等級2又はそのAE源の存在は全く検出されなかった。この原子力蒸気供給システムは、耐圧試験状態で構造上安全であることが確認された。

5. 主な引用文献

"European Test Procedures for NDT-ACOUSTICS Integrity Analysis of Nuclear Reactor Coolant Systems," Exxon Nuclear Company, Inc., XN-316.02.(1975)

6. 評価および問題点

原子力蒸気供給システムの各種構成部材へのAE法適用の実例が述べられており、FR17のAE法の適用を進める上での有益な示唆を与えていると考えられる。この試験で採用されたAE源の3等級分類法については、より詳細な説明が望まれる。

原文	出典	I.E.E.E. Transactions on Nuclear Science. JETNA, Vol. NS-18, No. 1, Feb. 1971		番号	30	頁数	5	写真		図表	8
	題目	High-Temperature Acoustic Sensors for Boiling Detection		著者	Garin, A. P., Anderson, T. T.						
和文	題目	沸騰音検出用高温センサー		所属	Argonne National Laboratory						
				抄訳者	室 幹 雄						
				所属	川崎重工業	発表月日		年	月	日	
<p>1. 概 要 炉の沸騰検出のためには、正常時の炉ノイズから、沸騰によって発生したノイズを弁別する音響感知システムが有効で、このため導波棒と通常のセンサーによる組み合わせか、浸漬型センサーによる方法が考えられ、周波数特性などの点から浸漬型センサーを開発することにし、2種類のセンサーを試作した。そしてその特性を測定して、実用化の可能性を検討した。</p>											
<p>2. 目 的</p> <p>LMFBR燃料チャネル中の沸騰早期検出用としての、強いガンマ線、中性子線および高温(650℃)といった、悪条件下においても信頼できる浸漬型音響検出器の設計、開発を目的とする。</p>											
<p>3. 内 容</p> <p><u>センサーの型、圧電物質</u></p> <p>周波数応答性の点より圧電型を選択し、圧電物質としては、圧電係数、キュリー温度などよりリチウムニオベートに限定した。エカット、1cmϕ、1mm厚の光学的クレート結晶を用いた。問題点としては、結晶の脆さ、酸素分圧の低下および温度上昇による抵抗値の低下と、放射線に対する耐久力がある。耐放射線に対しては、バアンデクラフからの電子ビーム(10¹⁰R)、⁶⁰Coのガンマ線(10¹⁰R)および287℃、537℃半々でのガンマ線(4×10⁹R)照射に対しては耐性を示したが、中性子の照射で結晶は幾分膨張し、また高温における高速中性子の影響については未確認である。</p> <p><u>センサー、材料</u></p> <p>シンメトリック・ドライブの浸漬型センサー2種を試作した。1つは排気管により大気と連結している。これはハウジングを密封した場合、昇温時の内圧上昇と、内部表面の酸化による酸素分圧が低下することを防ぐためである。センサー接液部は全てSUS304で、高温用同軸ケーブルは、酸化マケネシウムによりSUS304から絶縁されている。</p> <p><u>試験の準備</u></p> <p>センサーは一端600℃まで加熱しておくとし、熱により電極が酸化し、馴染みがたつき特性が安定した。試験方法は、水槽中でのハイドロホンおよび熱線による沸騰音響ノイズに対する周波数応答性と、炉装置内のピストン振動による、昇温</p>											

低周波応答性の計測を行なった。

試験結果

水中での周波数特性は、 $0 \sim 100 \text{ KHz}$ まで求めたが、可聴域でのピークは容器の共振に起因するものであった。試作センサーの感度は共に 500 pc/bar で、超音波に対する応答性は、エンボス板より機械加工したダイヤモンド型のセンサーの方がフラットであった。炉による試験は、 100°C ステップで 600°C まで加熱することを3回繰り返した。各温度における抵抗値を計測したが、リチウムニオベートの結晶単体より抵抗値の低下が著しく、その原因はケーブル用の酸化マグネシウムによるものと推定される。

4. 結 論

LMFBRのナトリウム中 (650°C) で作動する、浸漬型センサーは開発可能であろう。圧電素子としてのリチウムニオベートは、 537°C におけるガンマ線照射にも耐え、このリチウムニオベートを用いて試作した浸漬型センサーは、LMFBRの環境 (600°C) に耐えるために、電極面などは機械的に粗面である。またこれらのセンサーの作動は、低絶縁抵抗性のため 540°C に制限される。(昇温によるインピーダンス低下が著しい) しかしそれは絶縁物質と計測方法の改善によって、作動温度範囲の拡大が計れるであろう。試作した2種のセンサー中、機械加工・ダイヤモンド型センサーは、超音波周波数における音響測定に適する。

5. 主な引用文献

G. Bergmann, *Solid State Communications*, Vol. 6, 1968,

P. J. Jorgensen, R. W. Bartlett, *J. Phys. Chem. Solids*, Vol. 30, 1969,

William Primak, T. T. Anderson, S. L. Halverson, *Bull. Am. Phys. Soc.*, Vol. 15, 1970

6. 評価および問題点

AE用センサーとしては、更に高い周波数の特性解明が必要である。またより長時間にわたる高温下での特性変化の把握と、高温下における高速中性子照射による報告が待たれる。

原文	出典	NUCLEAR TECHNOLOGY vol.10, Jan. 1971	番号	31	頁数	9	写真	1	図表	4
	題目	IONIZING RADIATION EFFECTS IN LITHIUM NIOBATE		著者	WILLIAM PRIMAK et. al.					
和文	題目	LiNbO ₃ への放射線の影響		所属	Argonne National Laboratory					
	抄訳者	有井 満 (代理宮沢龍雄)		所属	東京芝浦電気(株)	発表月日	年	月	日	

1. 概要

高速炉の沸とう検出のために高温で動作するマイクロホンを開発している。炉内では高放射線があるためその影響を知る必要がある。そのため LiNbO₃ 単結晶 10mmφ, 1mmt (Z-cut, Y-cut) を VdG の電子線で照射した。

2. 目的

高温用マイクロホンのアクティブ素子として使用している LiNbO₃ 単結晶の放射線による影響を調べる。

3. 内容

材料と方法

材料は Isomet 会社のもので光学的性質の良いものを使用した。

測定は、光弾性(格子欠陥による膨脹)、光の透過率、静電容量、機械結合係数、共振点、および直流、1kHz の電気抵抗について行なった。

照射量

高速炉では 1 Ci/l の放射能があり Dose にすると 1200 R/sec (≈ 5 × 10⁶ R/h) が考えられ、それか LiNbO₃ 結晶内でイオン化し結晶に損傷を与える。それをバンデグラフで 6.25 × 10¹² の電子線束によって行なう。

実験

照射により変化したもの

- ・光の透過率がやや変化した。光の吸収率は室温での「エージング」により元に戻る。
- ・光弾性では数週間後に元に戻ることが確認された。更に膨脹を ad hoc 法によって算出した。

- 。体積変化は、 $10^5 \sim 10^4$ 程度である。
- 。電気機械結合係数 k_{33} は、6.5% 減少していた。
- 。比誘電率 ϵ_{33}/ϵ_0 は 5.5% 減少していた。
- 。照射中には抵抗が $10^9 \sim 10^8$ に変化した。

4. 結 論

炉内のγ線 200 日分の照射では大きな変化がな
ため音響検出器に利用することは問題ないであろう。

5. 主な引用文献

1. T. T. ANDERSON et. al. "Acoustic Boiling Detection in FBR" A.S.M Materials Engineering Congress (Oct. 1969) session 34.

6. 評価および問題点

高速炉内の使用についてはγ線の他に中性子による照射効果についても検討されねばならない。

原	出典	Nuclear Engineering and Design	番号	32	頁数	17	写真		図表	15
文	題	Protection Against Local Core Accidents	著者	van Erp, J.B., MacFarlane, D.R. 他						
	目	in Liquid Metal Fast Breeder Reactors	所属	Argonne National Laboratory						
和	題	液体金属冷却型高速増殖炉の局所的	抄訳者	中 島 玉 雄						
	目	炉心事故に対する保護	所属	石川島播磨重工業	発表月日	年	月	日		
1. 概 要										
<p>LMFBRの保護装置に通用することとを考へてセンサー類の動作特性に関する解析が示されている。燃料サブアセンブリ毎に1つをばそれ以上の原子炉トリップチャンネルをもつ保護装置に代わる方法を提案された。これは主に液体ナトリウム中の蒸気泡の崩壊を検出する圧カパルスセンサーに基づく保護装置である。</p>										
2. 目 的										
<p>本研究の目的は、LMFBRの局所的炉心事故に対する保護装置に交換する方法を提案することにある。これは原子炉トリップチャンネル数を減少させ、燃料の設計や再装荷作業に対して干渉の少ない、サブアセンブリ毎の保護装置に匹敵する能力をもつ、新しい保護装置の提案を目的とする。</p>										
3. 内 容										
<p>本論文は、まず高速炉と熱中性子炉との安全性および保護装置の違いについて解説し、次にLMFBRの局所的炉心事故を検出する目的で現在使用されている各種検出器（燃料サブアセンブリ出口温度センサー、サブアセンブリ入口および出口の流量センサー、燃料破損検出器）および現在開発中の検出器（圧カパルスセンサー、局所的沸騰検出器、異常反応度検出器）について説明されている。</p> <p>次に個々のサブアセンブリに於ける冷却材流量の減少による事故の状態を予測し、このときの流量センサーおよび温度センサーの動作を推定し、さらに流量減少による冷却材の沸騰に伴うこれらの各種センサーの応答特性について考察されている。</p> <p>また、1つのサブアセンブリの冷却材の流路が完全に閉塞された場合に生ずる各種現象のタイムシーケンスと、これに対する各種センサーの応答時間をコンピュータで計算し、流量センサーに次いで温度および圧カパルスセンサーの応答の遅さを示している。次に、この流路閉塞による冷却材の沸騰と、ナトリウム蒸気泡の崩壊によって生ずる圧カパルスについて解析し、圧カパルスセンサーの適用性について検討されている。</p> <p>最後に、これらのLMFBRの局所的炉心事故を早期に検出し、原子炉を急速に停止させるための、圧カパルスセンサーと異常反応度検出器を基にした新しい保護装置について考察し、出力1000MWe級のLMFBRに対する保護装置の構成例を提案している。</p>										

4. 結 論

LMFBR の燃料サブアセンブリ毎に1つまたはそれ以上の原子炉トリップチャンネルをモジュール従来の保護装置に代わる方法が提案された。これは上部および下部冷却材充満部に設置され、サブアセンブリ内の冷却材沸騰事故を検出する圧カパルスセンサーを基にしている。この新しい保護装置の特徴は、原子炉トリップチャンネル数を少なくするのみプラントの稼働率を向上し、また燃料の再装荷作業に対する干渉も少ないことである。

出力1000MWe級の大型LMFBR用の局所的炉心事故の安全保護装置としては、下記の原子炉トリップチャンネルを持つべきであろう。

- 1) 上部冷却材充満部に設置した圧カパルスセンサーに基づくもの (約5ch.)
- 2) アナログ型の異常反応度検出器に基づくチャンネル (約3ch.)
- 3) サブアセンブリの出口温度センサーに基づくもの (約15~20ch.)

5. 主な引用文献

van Erp, J. B., MacFarlane, D. R., Fauske, H. K.

"Protection Against LMFBR Local Core Accidents,"

Transactions American Nuclear Society, 13 (1970) 363-364

6. 評価および問題点

種々の予備試験データおよびコンピュータによる解析結果より、圧カパルスセンサーに基づく局所的炉心事故の保護装置が提案されているが、具体的な装置やLMFBRの実験データが示されていないのみ、有効性及び信頼性の確認が乏しい。

原	出典	IMEchE 1976. C196/76		番号	33	頁数	7	写真		図表	10
文	題	Nondestructive Inspection of Pressure Tubes		著者	O. A. Kupcis						
	目	at The Pickering Nuclear Generating Station		所属	B.A.Sc., Ph.D Research Division, Metallurgy Section						
和	題	Pickering 原子力発電所における		抄訳者	吉和 雅雄						
	目	圧力管の非破壊検査		所属	川崎重工業(株)	発表月日		年		月	
1. 概 要											
<p>Pickering 発電所, CANDU 重水炉の圧力管は, 1基当り390本もありそのNDI技術は未確立状態であった。そこでこれに対処するため, AEリーク検査法と超音波による新しい探傷装置を開発し, Pickering 発電所で実施した実際の検査結果により, その有効性が検討かつ確認された。</p>											
2. 目 的											
<p>CANDU重水炉における圧力管のリークをAE法によって, 迅速に検出, 位置決めする方法の確立と, 圧力管回転継手部の不貫通割れ(欠陥)の, 遠隔操作による自動検出用超音波探傷装置と同検査システムの開発, 実用化を目的とする。</p>											
3. 内 容											
<p><u>諸言</u> — Pickering 発電所には4基のCANDU-PHW型発電機があり, 1971年に発電を開始し, 1974年に3号基の圧力管(Nb 2.5wt%含有Zr, 長さ約6m, 内径103mm, 肉厚4.1mm)からの重水のリークを, カス側の露点計が検知した。このため新しい検査法を試み, 開発して1975年に補修を終え運転を再開した。次いで4号基を点検したところ, 同様に重水が発見され, この場合には開発した新しい非破壊検査法が広範囲に適用された。</p> <p><u>AEリーク検査</u> — 390本の圧力管は各種部品で連結されているので, 1圧力管からのリークを放射線により検査するのは, 非常に時間が掛り実用的でない。従ってリークさせながら, AE装置を用い発生する超音波ノイズを検出して検査できるのでないかと考え, 模型によるテスト(擬似リークの260°C, 500kHz, AEセンサーとオシロスコープ, 周波数スペクトルアナライザーによる監視)を行ない好結果を得た。しかし実際の炉では, 各圧力管が音響的に連結されているので隣接管に伝搬して判断を誤る, また他のチャンネルの冷媒を止めると, バックグラウンドノイズが増大するなどの問題点があったが, 現実には実際の場合においても好結果を納め得た。検査はAEトランスデューサを管から管へ手で移動し, その信号は0~1MHz間をX-Yレコーダ記録した。それらの1圧力管当りの所要時間は45秒であり, 検査時の冷媒圧力, 温度, 流れの状態が一定であれば, リークのある管は一般的に, より大きな振幅の周波数スペクトルを生じるが, 低周波域でのスペクトル(機械的ノイズに起因)は無視すべきで, リーク)</p>											

イズとしては、特に0.3~0.6 MHzのスペクトルに注意すべきである。また圧力と周波数スペクトルの関係は、リークの経路、性質および大きさに影響される。3号基で約3ヶ月を費し、これら各AEの試験、検査を実施した。その成果により4号基では、390本の全圧力管を5時間で検査し終え、2本のリーク管を正確に確認し得た。

超音波による検査 — 前記AE法は、貫通割れを迅速に判定し得るが、貫通に至るまでの割れに対しては、全く無効である。従ってこれに対処するため、遠隔操作による圧力管回転継手部の超音波欠陥検査装置を開発して、3,4号基の検査に用いその有効性を確認した。

4. 結 論

CANDU重水炉における圧力管のリークの迅速な検出、および回転継手の効果的な検査法は存在しなかったが、緊急にこの技術が開発され、実際に炉で動作することが証明された。しかし開発技術による検査限界を決定するためには、なお体系的な研究を必要とする。

5. 主な引用文献

6. 評価および問題点

リーク音をAE法によって検出する有効性が述べられているが、リークによるノイズは、本来のAE(破壊の予知)ではなく、事後対策用であること、また当報告に示された、周波数解析(スペクトル分布、振幅)は用いたAE検査の機器システムおよび被検査体などによる固有性を多分に含むものと推定される。なお当方法により、どの程度までの微小リーク量が判定できるかなどの問題点が残される。

原	出典	I Mech E 1976 C 203/76	番号	34	頁数	PP. 67-73	写真		図表	7
文	題	A Review of On-line Leak Detection		著者	G. J. Dau					
	目	Methods for Reactor Systems		所属	Electric Power Research Institute, Palo Alto, California, USA					
和	題	原子炉システムのオンライン漏洩検出		抄訳者	渡辺 哲夫					
	目	法のレビュー		所属	新日本製鉄	発表月日		年	月	日
<p>1. 概 要 各種のオンライン漏洩検出法の評価, 検討を行なった結果, 軽水炉システムに対してはAE法が非常に高い可能性を持っている事が分った。実験結果ではAE法によれば, 現在使用されている各方法よりも100倍以上も検出感度が高いことが分っており, 漏洩時に発生する音響エネルギーも漏洩の大きさに比例する事が解析された。</p>										
<p>2. 目 的 BWRシステムに於ける粒界応力腐蝕割れの事故原因追求, 対応策の検討の結果, オーステナイト系ステンレス鋼製の配管では leak before break の考え方で設計されているため, 管壁を貫通する漏洩が早期に発見さえ出来れば安全対策は十分とれるので, 高性能の漏洩検出法の重要性が見直され, 現在使用されている検出法の見直し, 新規開発の方向を定めるために検討, 解析が行なわれた。</p>										
<p>3. 内 容 内部加圧システムからの漏洩の各種の検出法のうちで, 原子炉に適用可能な条件として, 人間が接近しないでオンライン監視が出来ることがあるが, 之を満たす技術のうちで, 既に現在使用されているものは, 流量変化検出法, 流体中の核放射能検出法, 雰囲気中の放射性同位元素検出法, 圧力及温度変化検出法, 等である。しかしながら, 更に高感度で将来原子炉システムに於て使用される可能性のある技術としては, 音響ノイズ検出法, と湿気検出蒸膜法(導電率変化検出法)の2つが考えられる。</p> <p>音響ノイズ検出法は, 壁面を貫通した割れを通過して内部の流体が噴出する際に, 割れの中で生ずる乱流により大きな音響エネルギーが発生する。噴出圧力が限界圧力に達して choke flow が存在する状態になると, その時の噴出速度は流体中の高速と等しくなり, 発生音響エネルギーは噴出孔の断面積に比例する。従って, 発生エネルギーの監視を行えば割れの拡大を知る事が出来る という原理である。</p> <p>従来からある音響式漏洩検出器は, 可聴周波域又はこれに近い領域の音響ノイズをマイクロホーンを用いて計測するが原子炉システムでは接近困難な箇所が多く, 周囲ノイズが高いため実用不能である。一方100 kHz以上の高周波領域で計測を行なうAE法は漏洩検出にも非常に鋭敏な能力を示し, Elk River では $0.3 \frac{m^3}{sec}$ の検出に, 埋設パイプラインの試験では $8 \frac{m^3}{sec}$ の漏洩箇所の位置標定にそれぞれ成功している。更に CANDU 炉の燃料チャンネルの漏洩検出には正常運転状態で各チャンネル毎に, 発生音響エネルギーの 7.0 MHz までの周波数解析を行なうと, その周波数スペクトラムの変化程度から漏洩の程度まで推定することが出来た。</p>										

微小なドリル孔をあけた。実験大規模型配管の漏洩実験でも同様なデータが得られており、この技術を連続オンライン監視に適用する可能性が確認されている。

湿気検出蒸膜法とは、湿気が微量でも存在すると電気特性が変化するテープを用いるもので、電気抵抗、静電容量などの変化により電氣的警報信号を出せるものが既に3種類存在しているが、いずれもテープの耐熱特性が低いため原子炉機器に直接接着して用いることは出来ない。このうち1種類だけが、配管保温材外面にとり付け、保温材を通過して漏洩して来た微量の水分の検出に使えるとして軽水炉の特定箇所の監視に適用されている程度のようにある。

4. 結 論 AE法は軽水炉の配管系の漏洩検出監視法として、現存する方法に比べ非常に高性能な新方式になる可能性が存在する。非常に広範囲な対象を高感度で監視出来るだけでなく、漏れ箇所の位置推定能力、割れ拡大状況の監視能力なども有している。

しかしながらAE法が軽水炉の漏洩監視装置として実用化されるまでには、未だ

- A) 運転中の雑音レベルと漏洩信号との関係の確認と、周波数解析技術の活用。
- B) 炉型式毎に、AEセンサーの最適取付法の確立。
- C) 実際の割れについての漏洩率の変化に関する定量的実験データの収集。
- D) 雑音レベルの高い現場環境下での安定な連続運転の可能性の追求。

などの諸点の追求を経て、試作システムが設置され、現場での長期間の機能評価を受ける必要がある。

5. 主な引用文献

M.J. Lighthill "On Sound Generated Aerodynamically" Proc. Roy. Soc. (London) A. 211 (1952) p.564 and 222 (1954) p.1. 他多数

6. 評価および問題点

原	出典	I Mech E, 1976	番号	35	頁数	9	写真	7	図表	7
文	題	Detection of Stress Corrosion in Stainless	著者	K.E. Stahlkopf, et al						
	目	Steel Piping by Acoustic Emission	所属	Electric Power Research Institute						
和	題	ステンレス鋼に発生する応力腐食割れの	抄訳者	神 昌英						
	目	AEによる検出	所属	船舶技術研究所	発表月日	年	月	日		
<p>1. 概 要 軽水炉のパイプと同じサイズと材質を持つステンレス鋼(A304)パイプを試験片として用い、実際に近い環境条件での応力腐食割れ試験を行い、発生、進展する粒界応力腐食割れからのAEを計測した。AE計測結果は、割れの発生から貫通漏れまでの過程で、割れの進展状況に応じてAEレスポンスがあることを示した。しかし、現場への応用には、さらに研究を重ぬる必要がある。</p>										
<p>2. 目 的</p> <p>軽水炉のステンレス鋼パイプの溶接継手部では、粒界応力腐食割れが発生することを経験している。この割れの発生と進展過程をAE法を用いて検出するための基礎的資料を得ることを目的とし、将来、軽水炉へAE法を適用させることを考えている。</p>										
<p>3. 内 容</p> <p>試験には、A304材の長さ48インチ、外径4インチの2本のパイプを用いた。溶接施行は現場や工場で行われる普通のものであった。溶接部は突き合せになっていてパイプ1本当り3ヶ所あった。溶接終了後は、超音波検査を行って割れの無いことを確かめた。パイプには4点曲げの外圧を加え、内部に274°Cの高純度の水を、流速1.9~2.6 l/minで再生循環させた。水の溶解酸素は平均8.3 ppmで、電導度は0.1~0.5 $\mu\text{mho/cm}$ であった。このシステムでは、3.2 mmφ、長さ195 mmのA308材のウエイブガイドをパイプ表面に溶接して用いた。AE計測系は、長時間連続監視できるようにデジタル化されたAEデータを貯える特殊な機能を備えている。AE計測系のスレッショルドレベルは1Vとした。</p> <p>応力腐食割れの試験は、次の3つの期間に分けた。</p> <p>A: 13日間(最大曲げ応力; 28,500 psi, 288°Cにおける降伏力との比; 100%, 測定ひずみ; .12~.14, 計測系の全ゲイン; 88 dB)</p> <p>B: 18日間(最大曲げ応力, 降伏力との比, 測定ひずみについてはAと同じ条件であったが, 計測系の全ゲインは95 dBに上げた)</p> <p>C: 23日間(最大曲げ応力; 38,800 psi, 288°Cにおける降伏力との比; 136%, 測定ひずみ; .17~.20, 計測系の全ゲイン; 95 dB)</p> <p>A, Bの条件では割れは発生せず, AEも計測されなかった。</p> <p>Cの条件では貫通漏れを起して実験は終了した。実験中は、1日1回だけ減圧、再加圧させ、粒界応力腐食割れ自体からだけでなく、繰返し荷重時の割れ先端のこすれ、酸化被膜の割れなどの二次AE源の効果についても調べた。</p>										

23日間のAE試験の結果、最初の4日間は、AEは低レベルであった。4日目には、割れが発生し加速進行し始め、それともなっていてAEが増加している。5日目以後、リークの6時間前までは、比較的一定のAEカウントを示した。しかし、15日目から、時々高いカウント数のAEが計測され始めるが、この現象は応力から考えて、スロークラックの成長によるものと認められる。減圧、再加圧時のAEカウント数は、6日目から増加し始め、その後比較的高く^(最後まで)続いている。貫通漏れの6時間前から、それまでの10倍程度のカウント数が計測されている。貫通漏れでは、モニターはフルスケールになった。破壊面を調べた結果、貫通漏れ時の延性破壊の大部分を除いて、割れはすべて粒界破壊であった。

4. 結論

- (1) AEは、割れの成長に関連して発生する。すなわち、割れが発生がなければAEの発生もなく、割れが成長しているときには一定の発生があり、割れがパイプ壁に近くなるとAEの発生が増加する。
- (2) あるAEカウントレイトから高いカウントレイトへ移った場合には、なんらかの力学的原因によって小さな割れが増加したことを意味している。応力から考えて、スロークラックの成長に似ている。
- (3) 割れがパイプ壁面に近づくると割れの成長率が増加していることを示すAEの増加が見られる。
- (4) 高温、高圧水が、貫通した割れの部分から漏れに際しては、^(その漏水は)音響的に容易に検出できる。

5. 主な引用文献

- (1) R.W. Staehle et al "Fundamental Aspects of Stress Corrosion Cracking" NACE, Houston, 1969
- (2) G.J. Daw "The Sounds of Failure" Industrial Research, Vol. 13, No. 4, April, 1971.
- (3) K.E. Stahlkopf et al "Acoustic Emission, A Critical Assessment" Nuclear Safety, Vol. 17, No. 1, 1976

6. 評価および問題点

- (1) 軽水炉のステンレス鋼(A304)パイプの溶接継手部で、発生、進展する粒界応力腐食割れからのAEが検出でき、軽水炉へのAE法の適用の可能性を示した。
- (2) 現場に適用するためには、ノイズレベルとAE振幅の関係、AE振幅の減衰特性が重要であるが、AE振幅の大きさの考察がない。
- (3) 進展する粒界応力腐食割れからのAE発生機構について考察がなく、普遍性にとぼしい。
- (4) リーク音は検出できる。

原	出典	I Mech E. 1976		番号	36	頁数	11	写真	3	図表	12
文	題目	Acoustic Emission Test on a 25mm Thick Mild Steel Pressure Vessel with Inserted Defect		著者	P.G Bentley et al						
				所属	UKAEA Risley Engineering and Materials Laboratory, Warrington						
和文	題目	欠陥を挿入した 25mm 厚軟鋼製圧力容器の AE 試験		抄訳者	藤沢 和夫						
				所属	住友金属工業(株)	発表月日	年	月	日		
1. 概要											
<p>4個の人工欠陥を挿入した軟鋼製圧力容器について AE 試験を行った。最大の欠陥が破壊する迄 13回の加圧がなされたが、人工欠陥からの AE は検出されなかった。この原因としては、圧力容器での信号の減衰及び表面酸化膜の割れによる背景雑音が大きき要素となっており、</p>											
2. 目的											
<p>溶接された鋼製圧力容器の欠陥を検出し、破壊を防止する目的のために鋼製圧力容器における欠陥と AE 特性との関係を調査する。特に試験後の破面調査と溶接部の破壊検査を使用して、人工欠陥、自然欠陥の AE 挙動に関する情報を得る。</p>											
3. 内容											
1. 試験体											
<p>1.5 × 1.2 m の内挿板を溶接した 1.5 m 内径 × 4.3 m 長さ × 25mm 厚のシリンドリカル圧力容器を試験体として使用した。容器部には BS 1501-224-32 A 鋼 (焼準 - 冷間加工 - 625°C (2h) 応力除荷) を、内挿板には BS 1501-151-28 A 鋼 (圧延 - 焼準 - 625°C (2h) 応力除荷) を使用した。20 cm 長さの 4 個の軸方向欠陥が入れられ、うち 2 個 (A, B) には最大深さ 2mm の疲労亀裂が入れられた。</p>											
2. 計測結果											
<p>190 kHz の共振の 10 個のセンサを配置し、AE 源のオンライン位置標定を行い、次の結果が得られた。</p>											
① 欠陥 A の疲労亀裂進展中それに対応する AE は検出できなかった。											
② 本試験では欠陥 A が破壊する迄 13 回の加圧を行、だが、人工欠陥からの AE は検出できなかった。それに対し溶接部中にはいくつかの AE 集中点が検出された。											
3. 試験後の調査結果											
<p>4 個の人工欠陥すべてで、試験中に降伏が起きていることが明らかとなった。又溶接部中の AE 集中点には、スラッグ巻き込みに等しい非金属欠陥が検出された。しかしそのうちの小欠陥には AE 集中点のないものもあった。</p>											
4. 試験片試験との対応											
<p>内挿板に使用した板の残材から加工した 10 欠試験片による 4 点曲げ試験では降伏点及び亀裂進展中に AE が検出された。この試験片での結果と圧力容器における結果と</p>											

の矛盾は圧力容器における信号の減衰(18~26dBと評価)が原因である。又表面酸化膜の割れ等による分散されたAEが欠陥からのAEを隠してしまう効果もある。

4. 結 論

1. 溶接部の小さな非金属欠陥はAEにより検出可能であるが、金属人工欠陥(板厚の90%にも達するようなものさえ)は必ずしもAEによって検出できない。
2. この感受性の相異は、金属材料からのAEの振幅は非常に小さいこと及び信号の減衰が実際の圧力容器では大きいことにより説明できる。又表面酸化膜の割れによる背景雑音金属材料からのAEを隠してしまう。
3. 今後、溶接部中の人工欠陥のAE挙動についての調査が必要であろう。

5. 主な引用文献

1. Bentley P. G et al "Instrumentation for Acoustic Emission" 2nd AESymposium Tokyo 1974
2. Birchon D. et al "Acoustic Emission Monitoring of a Pressure Vessel" I Mech E. London 1974
3. Parry E. et al "Technical Report to RPA for NDT-Acoustics Testing of Culcheth Pressure Vessel"
Exxon Report 129, May 1973

6. 評価および問題点

原	出典	Nuclear Engineering (Jan. 1965) 18~22		番号	37	頁数	5	写真	2	図表	9
文	題	Experiments on Noise as an Aid to		著者	L.C. James						
	目	Reactor and Plant Operation		所属	Fast Reactor Engineering Group ERE Dounreay						
和	題	原子炉及びプラントの運転の助けとな		抄訳者	佐々木 荘 二						
	目	る音響ノイズの実験		所属	（株）日立製作所	発表月日	年	月	日		
<p>1. 概 要 原子炉内の沸とうなどによる音響ノイズを検知して、異常の前兆を知るための手法に関する実験の紹介。温度、リーク、液位、圧力、中性子束など原子炉内部の状態を音響信号に変換し、これを検知して他のノイズに対して識別し、監視する方法に関する英国 Dounreay での研究成果を述べている。</p>											
<p>2. 目 的 原子炉プラント内部での沸とうの状態、リークあるいは温度、液位、圧力、中性子束などの変化を音響信号として検知し、かつこれらをバックグラウンドノイズに対して区別できるようにすることにより、異常の早期発見とその対策を可能にするシステムの開発を目的とする。</p>											
<p>3. 内 容</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ 計測法：耐環境性トランスジューサ、ウェーブガイド、テープレコーダ、増幅器、スピーカ、スペクトル分析器、狭帯域増幅器などで計測システムが構成されるが、特にトランスジューサでは高温用の同心円筒キャパシタンス型が開発された。 ○ 沸とうノイズ：沸とうノイズは炉の異常の前兆となり得るが、核沸とう、膜沸とう、バーンアウトの段階がある。核沸とうでは、次の2つのノイズ発生機構がある。 <ul style="list-style-type: none"> (i) バブルの崩壊時に発生する可聴域ノイズ。 (ii) バブルが加熱体から離散するときの体積脈動によるノイズ。その周波数はバブル径に依存する。 <p>静水中の核沸とう音の周波数スペクトラムは1~10 KHz、静止Na中の沸とう音も1 KHzないし数KHz にスペクトラムのピークがある。その他DFR、DMTRでの沸とうスペクトラムの測定結果、沸とうが音響的に検知可能と期待された。</p> <p>核沸とうまでは、沸とう音出力は、熱流束とともに増加するが、膜沸とうになると音響出力は低下の傾向になる。</p> ○ 流体中の混入ガス又はバブルの検出 <p>静水中のバブル注入実験では、バブル脈動による音が検出でき、危険状態を起すような gas entrainment を検知できる可能性がある。また、バブルの存在による沸とう音の masking のおそれはないが、経験もされていない。</p> ○ 温度の音響的検出 <p>温度を音響的手段によって検知するための温度検知カプセルは、発熱体、特定温度</p> 											

で溶融するリンク、液体冷却材を内蔵し、所定温度以上になると、溶融リンクが溶融して熱放散が阻止され、液体が沸とうしてオリフィスよりの流出音を出す。

- 。 リーク検出：システムを真空中におき、外側にスプレーされた石けん水が、亀裂や孔から吸引される時、超音波が発生、検知されて微小なリークがわかる。
- 。 レベル検出：前述の温度カプセルの原理を用いて液中と液面上の差異を検知する。
- 。 圧力モニタリング：カプセルからの蒸気流出速度が圧力差に依存するのを利用して、音の周波数又は強弱に変換して圧力がモニタされる。
- 。 中性子束モニタリング：カプセル中の熱源として核燃料を装荷し、熱発生が中性子束に比例することを利用して、温度変化を介して中性子束がモニタされる。

4. 結 論 原子炉内部の局所的な状態を音響的に検出し、かつこれをバックグラウンドに対して識別できるようにすれば、外部にてその変化の監視が可能になる。そのために、水、重水、Naなどの沸とうのスペクトラムあるいは信号の特徴を明らかにする必要がある。温度あるいは圧力を音響信号に変換するカプセルが原理的に実現可能であり、その考え方は液位や中性子束の監視にも応用可能である。将来これらの音響検出技術が、原子炉やプラントの異常検知に活用される可能性がある。

5. 主な引用文献

- 1), G.S. Emmerson : Heat Transmission with Boiling, Nuclear Engineering (Nov.'60)
- 2), M. Strasberg : Gas Bubbles as Sources of Sound in Liquid, J. Acous. Soc. Amer. 28 (1) ('56)

6. 評価および問題点

原	出典	DUNEGAN/ENDEVCO DE 76-9	番号	41	頁数	20	写真		図表	18
文	題	Application of Acoustic Emission as an On-Line Monitoring System for Nuclear Reactors	著者	A.A. Pollock						
	目		所属	DUNEGAN/ENDEVCO						
和	題	原子炉オンライン監視系としてのAE の適用	抄訳者	仲佐博裕						
	目		所属	(原)電中央研究所	発表月日		年	月	日	
1. 概 要										
<p>米原子力規制委員会NRCとの契約下においてDUNEGAN/ENDEVCO社が実施中の軽水炉オンライン監視へのAE法の適用研究について、1975年6月-12月における研究経過を報告した。</p>										
2. 目 的										
<p>原子炉圧力容器の全面監視および配管系特定箇所監視とAE法を行なうに際しての諸経験を積む目的の研究計画で、大型商業炉に対してAE監視機器を実装する過程において得られた諸知見ととりまとめた。</p>										
3. 内 容										
<p>NRCの軽水炉安全研究プログラムの下に、DUNEGAN/ENDEVCO社は、(1) Calvert Cliffs 2号機(PWR)の原子炉圧力容器全面のオンライン監視計画、(2) Dresden 3号機(BWR)の再循環系バイパスラインノズル部のオンライン監視計画、および(3)上記の実機監視から得られるAEデータを評価するための基礎として、核燃料のAE特性の把握、の3つの研究計画を進めてきている。1975年6月から12月の本報告期間においては、主な研究作業はAE機器のプラントにおける設置計画と室内実験の実施計画との検討に費やされたが、これらの経験の中から以下のような貴重な知見が得られた。</p>										
(1) Phase A: PWR圧力容器のオンライン全面監視										
<p>AE変換子の配置は、DUNEGAN/ENDEVCO社製1032型システムを使用することを前提として検討した結果、容器胴部については2組のQuad Arrayシステム(正三角形の各頂点とその中心とに変換子を配置する方式)を用い、変換子間隔を12フィートに採ることによって十分に監視機能を果し得ることが結論された。また、下部ヘッダ部についても1組の擬似Quad Arrayシステムで監視可能である。しかし、圧力容器に取り付けてある6個のノズル部については、同システムのままでは信号の伝達経路上の問題が生じるため、合計18個のAE変換子を用い、ノズル部から発生したAE信号がノズル周辺を迂回せしめる必要個数の変換子に到達できるように配置した。以上のAE変換子配置によって、上部ヘッダを除く圧力容器全面の監視が、総計30個のAE変換子を用いて可能となる。</p>										

西独における PWR 蒸気発生器のルーズパーツ監視, などの AE 法の大型商業用発電炉に対する適用例が紹介されている。

4. 結 論

現在のところ, AE 法は多くの未解決の課題をかかえてはいるが, 一方では実プラントへの適用経験や AE 技術の実用化をはかる目的の大型プロジェクト研究の実績が着実に積み重ねられつつあり, 近い将来には, 原子力プラントの信頼性・安全性の監視法の主流となっていくことが予想される。

5. 主な引用文献

D. L. Parry: Exxon Nuclear Co. Report XN-310 (1975) ほか
6篇

6. 評価および問題点

原文	出典	番号	42	頁数		写真		図表	
	題目	Acoustic Emission and Fractographic Analysis applied to the Estimation of Crack Growth during Low-cycle Fatigue	著者	Funke G.-Pawlowski Z.					
和文	題目	低サイクル疲労中の亀裂成長推定へのAEと破面解析の応用	所属	IPPT-PAN POLAND					
	抄訳者	大津英明							
	所属	(株)神戶製鋼所	発表月日	年	月	日			
1. 概要									
<p>AEデータより低サイクル疲労の累積損傷を決定するとともに、疲労の潜伏段階と亀裂伝播段階の区別を試みた。その結果、AE計数率nおよびAE計数率の時間微分値n'を用いることにより、かなり正確に累積損傷度合を把握することができた。また、潜伏段階と亀裂伝播段階の識別もできた。</p>									
2. 目的									
<p>材料の疲労破壊に対する寿命の推定に関しては、破壊力学による計算方法があるが、実用構造物に対する適用には難しい面がある。そこで、リアルタイムにおける疲労破壊の情報をAEでキャッチすることにより寿命の推定に役立てようと試みた。また、AEの発生源についてフラクトグラフィにより解析を試みた。</p>									
3. 内容									
<p>供試材はAlMg5 (Al合金)で、試験片形状は切欠なし平板と切欠付き平板の2種類を用いた。試験方法は、曲げ角度$5 \sim 10^\circ$の低サイクル曲げ試験で行なった。AEトランスデューサーと超音波探触子を試験片端に取り付け、AE信号(AE事象数、AE計数率、AE計数総数)を測定すると同時に、急速亀裂伝播開始時を計測した。超音波探触子による亀裂伝播開始時の計測は、疲労による損傷部を通過する超音波の減衰を利用したもので、この方法で計測された急速亀裂伝播開始時は疲労寿命の約90%の時点であることがわかった。AEの発生状況には3つのタイプ(①疲労繰返し回数とともにAE計数率も単調に増加する。②潜伏期間中にAE計数率が増減する。③slow crack 成長時になって急に大きなAE計数率が見られる)が認められたが、寿命を推定する確実なデータとは成り得なかった。そこで、$n = N^\delta$ ---- (1) ($n = \Delta N / \Delta t$: AE計数率, N: 疲労繰返し回数, δ: 定数)が疲労繰返し回数、変形度合、切欠の有無にかかわらず、最終疲労寿命を100%とした場合に成立するものとして整理し直すと、寿命の10~50%ではバラツキが見られるが(初期段階では種々の場所で塑性変形が生じるためと考えられる)、寿命の50%を越えると、対教目盛表示で直線となり、(1)式が成立することがわかった。直線関係が成立するのは潜伏期間を過ぎた時点からで、切欠なしの場合、寿命の約50%のところであり、切欠付きの場合は50%より少し前のようであった。これよりある材料のAE発生状況が予め分っていれば、AE計数率を測ることにより疲労寿命の推定がある程度正確に行なえる可能性があることがわかった。また、$n' = \Delta n / \Delta t$ (AE計数率の時間微分値)で求まるn'を計算することによっても疲労寿命や累積</p>									

損傷を予測できる可能性が認められた。疲労寿命の各時期における n を、7本の試験片について各々3点ずつ計算し、その中間値9点の平均値と疲労寿命の各時期との関係をグラフにプロットすると、累積損傷が増すにつれて n の値も増加する傾向にあった。この傾向はAE計数総数に関係なく成立し、 n の値より破壊の危険性を評価できそうである。

フラクトグラフィにより解析した結果、疲労初期段階におけるフラットな破面とAEとは特に関係なく、大きなAEと関係しているのは、疲労最終段階におけるSecondary crack, Branching crack, および Cliffsなどであることがわかった。また Striationに関しては、大きなAEとはあまり関係しないようであった。

4. 結 論

- ①疲労中に得られるAEデータから、潜伏段階と亀裂伝播段階とを明確に区別することができた。切欠なしのフラットな試験片では、疲労寿命の約50%以後より亀裂伝播段階が開始することがわかった。
- ②累積損傷は2つの方法で測定可能である。1つは、亀裂伝播段階において、式 $n = N^b$ に則り変化するAE計数率 n から予測する方法であり、他の1つは、疲労繰返し回数が増え、最終段階に近づくにつれて増加するAE計数率の時間微分値 n' から推定する方法である。
- ③フラクトグラフィ解析により、疲労中に観察される大きなAEの発生源となるのは Secondary crack, Branching crack, および Cliffsであることがわかり、これらの特徴的な様相は疲労亀裂伝播の最終段階において顕著に認められた。

5. 主な引用文献 [1] Pawlowski Z., Proc. IV Intern. Conf. on Nondestructive Testing, London 1963, 127-130 Butterworths, London 1964. [2] Kawasaki T., Yokobori T. etc Rep. Res. Inst. Strength and Fracture of Materials, Tohoku Univ., 9(1973), 65-67. [3] Forsyth P.J.E., Acta Metallurgica, 11(1963), 703-715. [4] Yokobori T., Aizawa T., Rep. Res. Inst. Strength and Fracture of Mat., Tohoku Univ., 9(1973).

6. 評価および問題点

- 疲労寿命とAE発生状況との間の関係を、ある程度把握しうることを見出したことは意義がある。
- 式 $n = N^b$ が疲労亀裂伝播段階で成立するとしているが、かなりのバラツキが見られ、損傷度を推定するには難しそうである。
- AEの測定条件が全く付記されておらず、適確な判断が困難である。

原	出典	J of Br. Nuclear Energy Soc. No.3 July 1976	番号	43	頁数	6	写真		図表	7
文	題	The Development of Acoustic Monitoring	著者	E.J. Burton						
	目	Techniques for LMFBRs.	所属	UKAEA, Risley Engineering and Materials Lab						
和	題	LMFBRsのための音響モニタリング技法の	抄訳者	中村哲男						
	目	開発.	所属	三菱重工業(株)	発表月日		年	月	日	
<p>1. 概要 A E 技法, 超音波技法, キャンベーターモニタリング, 音響診断技法, 音響振動技法につき, LMFBRへの適用と問題点につき示している。適用を以下に示す。 (1) 製造中の欠陥は超音波検査と A E. (2) 運用ミスによる機械的故障には超音波による可視化。 (3) 腐蝕, 浸蝕による機械的故障は音響事象の検出 (4) 過熱による炉心損傷にはナトリウム沸騰ノイズ検出 (5) 疲労による機械的故障には振動モード</p>										
<p>2. 目的 音響モニタリング技術が原子炉システム用に開発されており, ナトリウム冷却炉への使用に強い関心が持たれているので, 最近の重要な意義ある発達を紹介する。技術のトピックスを述べて紹介する。 トピックスは 種々の故障モードの初期事象の予測或いはモニタリングに関連する計測技法に関するものである。</p>										
<p>3. 内容</p> <p>3.1 AE (応力波放射)</p> <p>LMFBRへの適用には (1) 材料の音響特性への依存性と (2) 実際の大きなコンポーネントでの S/N の問題がある。伸縮鋼の欠陥識別では研究室で使っているものより検出感度を約20倍改善する必要があると Dawson と Ingham の研究は指摘している。LMFBR のステンレス鋼の候補材の音響特性の測定が必要であり, 多分検出感度改善が必要であろう。米国で溶接中モニタリングが信号と上げの方法を用いて克服されたので, 検出感度改善が達成される可能性もある。容器健全性への適用では超圧試験より低い圧力であり, 将来どうなるか問題である。</p> <p>最も興味ある適用は Bentley & Cowen による 応力腐蝕への適用であり, イミミョンと腐蝕割れの関係確立のために研究が続けられている。</p> <p>3.2 超音波</p> <p>問題の一つはトランスデューサである。300°C までは Bishop がカプセル入りの PZT を保護ダイヤフラムに溶着する技術を開発した。問題は (1) 適当なゲインゲージ材と (2) 300°C でナトリウムに浸し得るダイヤフラムであり (2) には 1/2 は金属ヒューケルの効率が研究されている。</p> <p>650°C までの使用には Bishop 等がニオブ酸リチウムトランスデューサを開発している。保護ダイヤフラムに結晶をボンドするのは未解決である。また放射線照射の影響が問題である。他方エコーガイド法が研究されているがその設計と材料が重要な問題である。画像化に対しては発達した情報処理による画像技術が取り入れられた。</p>										

3.3. キャビテーション

音響検出によるキャビテーションの検出、AEの位置標定法も音響検出にも適用しキャビテーション源検出に使用されている。

3.4. 音響診断

炉心のナトリウム漏れ検出に適用されサブ冷却とバルブ漏れの差が検出された。

"Spent事故"に対する有効な安全装置として、漏れ特性の音響検出改善がなされている。

3.5. 音響振動

音響振動による構造物の破損の可能性の詳細研究のため、音響振動の構造物への結合機構の解明研究がなされている。音響計測により、構造物の安全な運転を保證を目論む研究が進められている。

4. 結 論

最近の開発は音響的モニタリングが LMFBR の信頼性と安全を保證する上で重要な役割を果たすことを示している。

現在 高温での信頼性におけるトランスデュースが無いため、いくつかの適用が制限を受けているが、有意な進展がなされつつある。

最もみどりのある分野は 信号をエグゼクティブの改善、およびデータ処理也、過去の記録 あるいはナトリウム内での画像化における改善等のためのコンピュータの利用の増大である。

AEやキャビテーション検出応用を示したような位置標定能力の獲得也、2~3の物理的変数のシミュレーションによる検出達成のための相関技法の多用化也、構造や他の故障を予想するための現象のより高感度の検出の可能性をもたらしこ

5. 主な引用文献

- (1) "The Application of Acoustic Emission Measurement on Laboratory test pieces to Large Scale Pressure Vessel Monitoring" Dawson D.G. and Ingham T. 3rd Int. Conf. Structural Mechanics in Reactor Technology at Brussels 1975

6. 評価および問題点

原	出典	番号	45	頁数		写真		図表	
文	題	著者	岸 輝雄						
		所属	東京大学宇宙航空研究所						
和	題	抄訳者							
		所属		発表月日		年	月	日	
文	目	SUS304の引張り変形に伴うAEの温度依存性							

1. 概 要

SUS304の引張り変形に伴うAEの温度依存性について実験したものである。back stress の値を求めることによりバウシヨンガーAEピークとの関連を検討し Kaiser 効果の明瞭度に説明を与え、AE振幅分布を有意な物理的パラメーターとして用いることを示している。

2. 目 的

原子力用配管等に数多く用いられるSUS304のAE挙動を明らかにすることを目的としている。特に平滑材の引張り試験において、その温度依存性に関する資料を得ること、および、Kaiser 効果の物理的意味を明らかにすることを目的としている。

3. 内 容

Fig 1は、RMS電圧で示したAE信号の温度依存性を示している。どの温度においても、降伏点近傍においてのみAEは観察されており、加工硬化領域では殆んど観察されていない。又、測定温度範囲では、温度の上昇と共に、RMS電圧が上昇しているのが特徴である。これらのAE信号に酸化膜等、雰囲気の影響は殆んどないことが確認された。

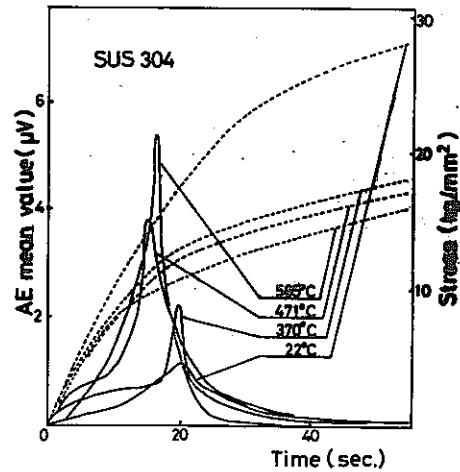


Fig 2は、このAE信号のリングダウン計数の振幅分布を示したのである。横軸は、しきい値電圧 V_t の1/2乗にプロットしており、その積分モード振幅分布 $I(V_t)$ は、次の形で整理されている。

$$I(V_t) = I_0 \exp(-Q \cdot V_t^{\frac{1}{2}})$$

又、観測された、オシロスコープ上の波形は、突発型成分の多いものであった。

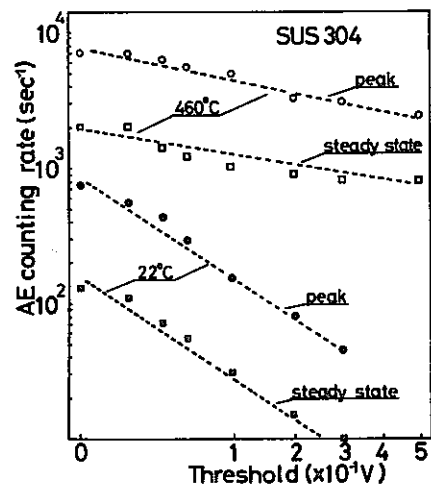



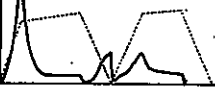


Fig 3は, Kaiser効果の結果の一例である。SUS304では, 除荷時にAEが観測され, それ故にKaiser効果は明瞭には表われない。Kaiser効果は, 除荷時の塑性歪の大小と摩擦に結びつくものであり, 応力及転位のバウシッが-効果に伴うAEピークを解析して得られたback stressの大小でよく評価できる。図に示したようにback stress 20%~25%を境にして, それより大きいものではKaiser効果は成立しにくいと云える。

	Kaiser Effect	mean back stress
Al		16 %
Cu		15 %
α Brass		22 %
SUS 304		37 %

4. 結 論

SUS304では, 塑性変形に伴うAEはそのactivityが小さく, AE法が適用しにくい材料と云えるが, 温度の上昇に伴い大きくなり, 高温では, これを利用することは可能であろう。又, 亀裂進展に伴うAEが, 単に亀裂近傍の降伏域以外から放射される場合には, 両者(亀裂のAEと, 塑性変形誘起のAE)を分離しやすいと云う状況が考えられる。

塑性変形に拘わらずそのAE信号は, 突発型の成分が多く, この傾向は温度によりあまり依存していかないが特徴である。一般に, 積層欠陥エネルギーの低い材料は, 突発型成分が多く, 高温になるとそのエネルギーが増大する。一方, 高い積層欠陥エネルギーの材料は, 連続型AEで, 温度上昇によりAEエネルギーは低下すると云える。

5. 主な引用文献

6. 評価および問題点

SUS304のAEの温度依存性を, 波形観察, 振幅分布の測定と併せ観察した所に意味がある。FBRへのAE適用の基礎資料とカリウムのだろう。

原	出典	番号	46	頁数	写真	図表
文	題	著者	岸 輝雄			
和	目	所属	東京大学宇宙航空研究所			
文	題	抄訳者				
目	題	所属	発表月日	年	月	日

1. 概 要

2½Cr-1Mo鋼の引張り-圧縮試験, 破壊靱性試験におけるAE挙動を調べたもので, 塑性変形におけるAE, AEの歪速度依存性, AEの振幅分布および振幅分布比を求めている。また切欠き試片の引張り試験時のAE, 破壊靱性試験に伴うAEについてデータを求めている。

2. 目 的

2½Cr-1Mo, 圧力容器鋼の, 引張り試験, 破壊靱性試験におけるAE信号を測定しFBRへ, AE法を適用する基礎資料をうる。

3. 内 容

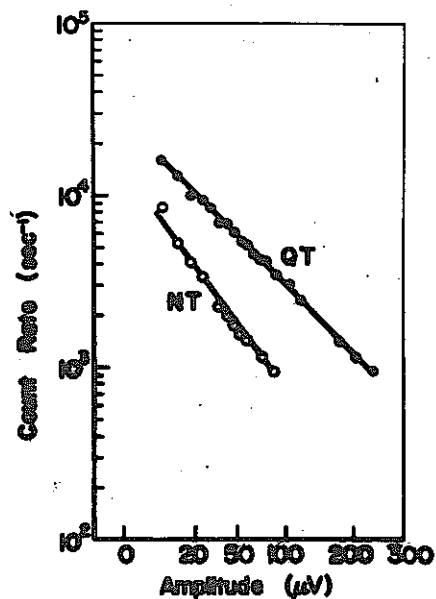
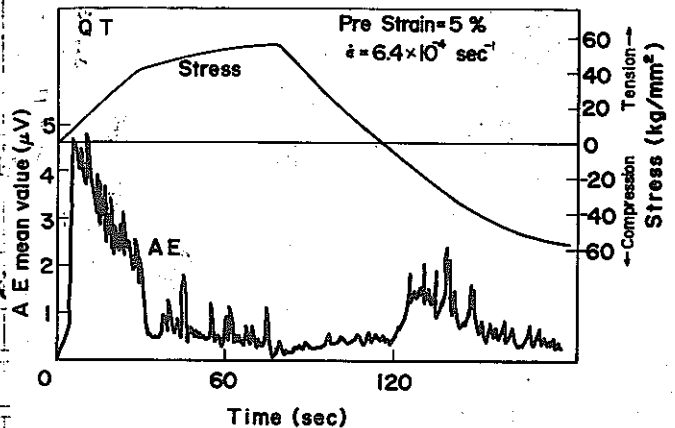
QTおよびNT丸棒材を用いて実験を行った。

Fig. 1に示すように, 両材料とも, 弾性域と思われる非常に低歪力で若干AE信号が観察されたのみで, その他の領域では殆どAEは放出されていない。また歪力及転に伴いAEピークが見られる。

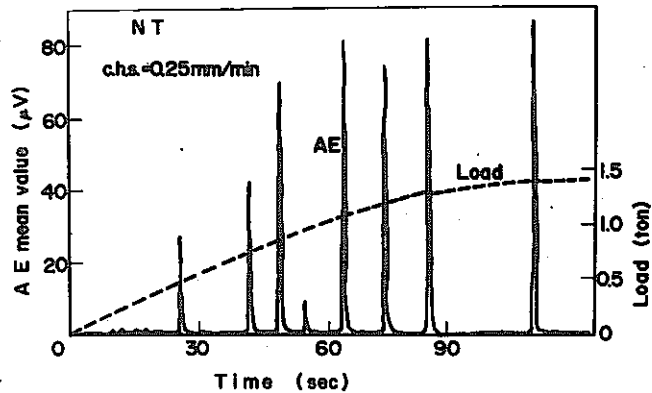
Fig. 2は, この降伏点近傍のAEのリスティング・カウンタによる振幅分布を示している。次に次式の形で整理することができ, 波形観察によると, かなり突発型AEが観察されている。

$$I(\nu) = I_0 \exp(-a \cdot \nu^2)$$

Fig. 3は, 最劣予き裂を入れたNC材料を引張り試験した結果である。このように低強度材では, blunting により, AE法により, さ裂成長を捕えるのが難しいと云える。しかしながら, pop-in の開始よりかなり前にAEが生じており,



安定な裂の成長が既に生じている可能性を示している。ただし、環状切欠をゆえに、他の手法で、き裂進展を捕えることができなかった。



4. 結 論

圧力容器用低合金2 $\frac{1}{2}$ Cr-1Mo鋼においては、降伏応力近傍に若干のAEが観察されるが、加工硬化域では、その信号は小さい。観察されるAEは、突発型成分が多く、積分モード振幅分布表示において、整理することができた。

疲労予き裂を導入したものは、pop-inの直前に大きなAE信号が観察され、き裂成長の可能性を示している。

5. 主な引用文献

6. 評価および問題点

圧力容器用2 $\frac{1}{2}$ Cr-1Mo鋼では、塑性変形に伴うAEのactivityは小さいが、き裂進展に伴いかなり大きな信号が現われ、き裂探知には、AE法が有効に使える可能性を示している。今后は、温度依存性の資料が必要と思われる。

原	出典	Journal of the British Nuclear Society	番号	48	頁数	pp. 183 - 192	写真		図表	9	
文	題	Acoustics diagnostics and nuclear power plants	著者	E. J. Burton							
	目		所属	U.K.A.E.A., Risley Engineering and Materials Laboratory							
和	題	音響診断技術と原子力プラント	抄訳者	渡辺 哲夫							
	目		所属	新日本製鉄(株)	発表月日		年	月	日		
<p>1. 概要 音響診断技術の特徴, 計測法, 信号処理技術, 信号解析システム例などの概要を解説した後, この技術が各種の原子力プラントの設備診断に適用された具体例を, 原子炉の圧力容器及び構造物要素一般, 及び高速炉, ガス冷却炉, 軽水炉, タービンの各設備毎に 欧米に於ける事例, 特に U.K.A.E.A. REML の研究事例を中心に紹介している。</p>											
<p>2. 目的 原子力プラントの設備は複雑で, 人が容易に接近し難いため, その安全監視のための設備診断技術としては 種々の多数の検出端からの信号を利用した各種の方法が総合的に使用されているが, 音響診断技術はその中でも有力な新技術と考えられ, 原子炉以外の分野での成功技術を原子炉に適用用途すべく研究が進められている。その進行状況を成功例の紹介を通じて行はんとするものである。</p>											
<p>3. 内容</p> <p>1. 音響診断技術の概要; 利点及び欠点, 計測法及び信号解析法の概要について一般的な紹介があるが, 教科書的内容なので省略する。信号解析法の実例として, U.K.A.E.A. では ICL4-70 計算機を用いた音響信号測定データの収集, 解析, 異常判定などの機能をもつ音響診断用信号解析システムを開発し活用している。</p> <p>2. 音響診断技術の適用例</p> <p>i) 圧力容器及び構造物構成要素の安全監視への適用例; 原子炉一次回路の健全性診断のために, 定修時, 或は運転中に微小クラックの発生の検出法の開発が進められているが, この分野では AE 法が最も注目されている。UKAEA Risley でも PDP-8L 計算機を用いた試作 AE 計測システムを用いてガス冷却炉での実測や, 実験室的研究を行っている。現時点の技術レベルは, 高張力鋼製などの brittle な圧力容器については水圧試験時の検査に AE 法が適用可能である事は分っているが, on line monitor 用技術としては未だ各所の研究成果が不十分だ, との評価である。</p> <p>ii) 高速炉への適用例; Na 冷却炉の炉心部での boiling の検出を音響的に行う方法を UKAEA は CEA (仏) と共同で Grenoble で実験中であり, 各種条件下での boiling の音響スペクトルが 前記の音響信号解析システムにより得られつつある。又 Na₂O 水回路向の漏洩検出を音響法で行う研究が行われているが, 現在のところ on line では困難だが, 定修時の gas bubble 漏洩の音響的検出の可能性は確認されている。更に米国の EBR-II の IHX での loose parts の検出が 部品脱落状態での固有振動数の変化を計測する事により成功した事例の報告が紹介されている。</p>											

iii) ガス冷却炉への適用例; Windscaleでは炉容器内の振動を計測し、周波数解析を行って系の異常を検出している。又別の例では燃料系のサンプリング配管の漏洩を検出するのに管端より漏洩孔までの有効長をその配管の共振特性の変化を計測することによって成功した事例も紹介されている。

iv) 軽水炉への適用例; core barrel及びcore support plateの振動monitor, 及びloose part monitorが欧州各地の発電所で実験されている。U.K.A.E.A.のSGHWRでも炉内燃料系の局部摩耗を加速度計による打撃音の検出によって成功した事例が紹介されている。

v) タービンへの適用例; タービンロータの初期欠陥の検出法が各所で研究中であるが、現時点では音響計測よりも軸の変位、振動の計測の方が有効なようである。

4. 結 論

原子炉システムの安全性確保のために音響診断の重要性が次第に高まりつつあるが、その実用化のために解決すべき当面の課題はon line用の高信頼度の変換子と、変換子から得られた信号を高度に処理出来る信号解析処理技術であるようだ。

更に計測結果から異常を推測する技術は、測定対象プロセスとその異常の内容が事前に完全に理解されていてこそはじめて可能となるので、この技術の完成には診断対象プラントの音響的な挙動の計測と、理論的解析の両面から今後十分な音響学的データを収集、蓄積しておく必要がある。

10年以内には原子力プラントの各設備にon line設置された変換子による音響的な安全監視が可能になると予想されるが、音響診断法単独での活用と云う形ではなく、他の種々の計測データと組合せられて総合的にプラントの詳細挙動の解析を行うシステムの一部として使用されて行く事であろう。

5. 主な引用文献

Bentley P. G. et al. Acoustic emission as an aid to pressure vessel inspection. Conference on Periodic inspection of pressure vessels. I. Mech E. London, 1972, 54-66.

他多数 合計26編。

6. 評価および問題点

1974年時点までの原子力発電所設備の音響診断技術の適用に關する概括的な総評であり、その時点のトピックスを網羅しようとしたため各引用例の内容説明はごく浅く文献抄録集的な色彩が強い。

今回の目的であるAE技術の原子力設備への適用可能性についてはRisleyでの経験に基づきごく一般的な解説しかなされていない。もしAE技術が原子力設備に於ける音響診断技術の分野でどのような位置づけにあるかを認識することには参考になり得るであろう。

原文	出典	For presentation to the European W.G on AE		番号	49	頁数	6	写真	1	図表	4
	題目	Acoustic Emission from Stress Corrosion Cracking in 316 Stainless Steel.		著者	P. G. Bentley						
和文	題目	316ステンレス鋼の応力腐食割れとAE		抄訳者	石原 耕司						
	所属	日本鋼管(株)		発表月日	年	月	日				

1. 概 要

SCCに関するAEの研究は、種々の材料および環境下で行われ報告されているが、従来は低濃度陰イオン下における鋼の割れが特に興味の対象となっていた。UKAEAは、化学的により苛酷でかつ高陰イオン濃度状態がもたらさるFRの循環系におけるSCCの可能性に注目し、予備実験を行った。

2. 目 的

AEが高濃度陰イオン下におけるSCCの研究手段として有効か否かを検討する。

3. 内 容

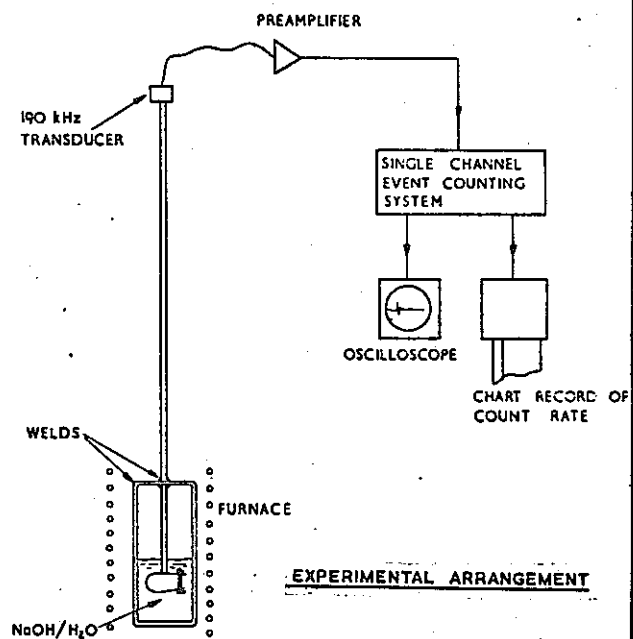
実験材料として、二種類のオーステナイト系ステンレス鋼を使った。一種類は耐腐食割れ性の低いもの(タイプA)であり、他は耐腐食割れ性の高いもの(タイプB)である。これらのへリ継手板から断面形状 $0.5\text{ cm} \times 0.08\text{ cm}$ の試験片を切りだしU型に曲げ、ホルトで拘束し、高濃度の苛性ソーダ溶液のカソードセル中に入れて実験を行った。この時の応力は正確ではないが降伏応力程度と思われる。

苛性ソーダ溶液の水分濃度は4, 10あるいは18%, 温度は300あるいは350°C, 圧力は1あるいは10気圧である。

実験状況を図に示す。

使用したAE装置は1chのイベント・カウント方式のものであり、センサーの共振周波数は190kHzである。

このような条件のもとで総計九回の実験を行った。このうちタイプBのもの二試験片について、水分濃度4%, 350°C, 1気圧で実験を行ったがAEのイベント・レートは全く低く、実験終了後の調査でも割れは検出されなかった。



タイプA材については七回の実験を行った。実験後の調査によれば試験片にはすべて割れが入っていたが、このうちの五実験についてはAEアクティビティと割れとの間により関係が得られた。しかし他の二実験については、一つはカプセルのリーフのためよりAEデータが得られず、他の一つは割れが入っていたにもかかわらずAEアクティビティは低かった。原因は装置の故障と思われる。

4. 結 論

予備実験であり、詳細な結論は出せないが、経験的には損傷は容易に検出されるAEをとらなうといえる。上述の実験条件では、AEは温度が300°C近くに上ると発生しはじめ、約1時間、場合によっては約10時間発生しつづける。この現象は割れが、損傷により応力が緩和されるまで進展するという関係とよく一致している。

現状では損傷度あるいは残留応力の独立で連続的な計測方法がないので、AEと割れとの定量的な関係を調べることはできない。しかしAEの発生のしかたが環境の苛酷さと関係しているので、AEイベント・レートがSCC実験におけるき裂進展速度の簡単な計測法になりうる望みがある。

5. 主な引用文献

6. 評価および問題点

原文	出典	NUREG - 75/101		番号	50	頁数	34	写真	0	図表	10
	題目	Inspection of Nuclear Reactor Welding by Acoustic Emission.		著者	Prime, D.W., Clark, R.N.						
和文	題目	アコースティック・エミッションによる原子炉用溶接の検査		抄訳者	中 具 玉 雄						
				所属	石川島播磨重工業	発表月日	52年4月13日				
1. 概 要											
<p>本研究は、原子炉用配管および圧力容器の溶接に対する現場用AEモニター装置の可能性を示すために実施された。本報告書は、現場用ポータブルAE溶接モニター装置の用途、および計46溶接パスの校正用試験と、計17溶接パスの生産工場試験の結果を示されている。</p>											
2. 目 的											
<p>本研究の目的は、現場用AEモニター装置を用いて、進んだ非破壊試験の取付けよって改善された溶接品質の、安全な原子炉配管や圧力容器を製作することである。この第一期の目標は、AEによる原子炉配管溶接のリアルタイム監視のための装置の設計パラメータを明らかにし、その可能性を示すことである。</p>											
3. 内 容											
<p>本書は米国原子力規制委員会(NRC)の後援による3年間の研究プログラム第一期の中間報告書である。この第一期(1974.11.1~1975.4.30)の研究は現場用ポータブルAE溶接モニター装置の用途、および装置を校正するための校正用試験、さらに実際の製品溶接に対する生産工場試験が含まれている。</p> <p>校正用試験には合計46の溶接パスがモニターされ、これには36のTIG溶接パス、12のMIG溶接パス、46のサブマージドアーク溶接パス、および2つの手動メタルアーク溶接パスが含まれている。すべての溶接は磁気テープで記録され、現場用AEモニター装置を校正するために使用された。</p> <p>溶接欠陥が多層溶接部のV字溝のパスに入られた。これは銅材アーク中に送り込んだり、また溶接バスを置く方法のどちらかによって作られた。</p> <p>この校正用試験データは7種類の溶接タイプを示し、その1つは極めて良い欠陥発生特性を示し、2つは非常に良い特性を、1つは良い特性を、さらに研究を必要とするもの4つあった。</p> <p>全くAEによる監視の可能性を示さない溶接タイプはなかった。</p> <p>生産工場試験は、実際の製品に対する17の多層溶接部から成り、材質は炭素鋼およびステンレス鋼で、溶接方法はTIG, MIG, サブマージドアーク溶接である。AEモニターは、ASME規格を要求されているラッシュグラフ、およびダイチェックやUTのような他の非破壊試験法と、欠陥の位置や寸法および分別能力について相関性を調べられた。</p>											

この生産工場試験の内、又口径のステンレス鋼のTIG補修溶接、フラックの再発生を示すダイチェックの結果が得られ、この補修溶接にモニター中のAEによるモニタリングが検出された。ラゾグラフの結果がまだ入手できていないので、現時点でこのAEモニターの結果をすべて確認することはできていないが、AEによる溶接の監視の見込みは良好である。

4. 結 論

修正用試験データおよび以前の経験に基づいたAEの欠陥検出の可能性を示す。

(材 質)	(溶接方法)	(欠陥検出能力)
炭素鋼	TIG	非常に良い
・	MIG	・
・	サブマージアーク	極めて良い
・	手動メタルアーク	未定-有望 (さらに研究が必要)
ステンレス鋼	TIG	良い (さらに研究が必要)
・	MIG	良い
・	サブマージアーク	未定-有望 (さらに研究が必要)
・	手動メタルアーク	・ - ・ ()

5. 主な引用文献

Jolly, W.D. "An In Situ Weld Defect Detector, Acoustic Emission"
BNWL-817 (1968)

Omo, K. "Acoustic Emission and Microscopic Deformation" UCLA (1974)

6. 評価および問題点

各種溶接欠陥からのAE信号を背景雑音と区別し、分類する方法が開発されるまで確立されていると述べられているが、その具体的方法および実験データが示されていないので、研究報告としては不十分である。

また、試験体の形状や溶接条件なども詳細に示されていないので、実際の溶接モニターとしてすぐ役立つことは困難であろう。

原文	出典	3rd Conf. Periodic Inspection of Pressurized Component (Sept, 1976, London) C203/76	番号	51	頁数	7	写真		図表	6
	題目	A Review of On-line Leak Detection Method for Reactor Systems		著者	G. J. Dau					
和文	題目	原子炉システムのオンラインリーク検出法の展望		抄訳者	佐々木 莊二					
				所属	(株)日立製作所	発表月日		年	月	日
<p>1. 概要 原子炉システムの圧力バウンダリからのリーク検出法について概観し、最も有望とみられる方法として、音響的監視法および感湿テープ法をあげている。特に Acoustic Emission 監視法は法的規準の要求に対し約100倍の感度を有し、かつ、リーク臭の位置の標定やリーク部の規模の評価が可能であることを示唆している。</p> <p>2. 目的 原子炉圧力容器あるいは配管系の破壊前のリークを早期に発見し、災害の未然防止をはかる目的で、検出感度の高い Acoustic Emission 法と感湿テープ法に重点を置いて検出性能ならびに適用性に関する評価・検討がなされた。</p> <p>3. 内容 リーク検出は原子炉圧力容器あるいは配管系の破壊の前ぶれの早期検知手段として重要であり、次の性能が要求される。</p> <ul style="list-style-type: none"> ◦ 温度 300°C, 中性子束 $10^7 n/cm\cdot sec$, ガンマ線 90 R/hr の環境に耐えること ◦ リーク流量 3.8 l/min (1 gallon/min) が検出可能、 ◦ 平常運転時のバックグラウンドノイズに対してリーク信号が区別できること、 ◦ 連続オンライン監視可能、 ◦ 低コスト、 ◦ 法的基準に適合、 <p>米国では次の3種のリーク検知手段を備えておくことが義務づけられている。(1) 漏水量の監視、(2) 空気中の飛沫による放射能監視 (3) 空調機からの凝結水の流量監視もしくは空気中のガス状放射能の監視。</p> <p>広域をオンラインで監視できるという点で、リークを音響的に検知する方法が有望である。</p> <p>○ 音響的監視法</p> <p>クラック等からのリーク音の強度はクラックの開口面積に比例する。したがってリーク音の強度を監視することにより、クラックの拡大に関する情報が得られる。AE計測法は (1) オンライン監視に適し、(2) リーク臭の位置の標定が可能で、次のような実プラントでの適用で成功を収めている。</p> <p>ELK Riverの原子炉では0.3 ml/sec 程度のリーク箇所、また埋設されたディゼン燃料パイプからの 8 ml/sec のリーク源が正確に標定され、さらに CANDU 炉</p>										

では圧力管14本のリークが確認された。

○ 感湿テープ法

湿気におれることにより電気的特性が変化するテープを用いる方法で、高感度かつ簡便にリークを検出することができ、次の3種が考えられている。

- (1) 水溶性紙片の抵抗減少を検知する方法、
- (2) 誘電性テープがリークのために破壊したときの静電容量の低下を検知する方法、
- (3) 微量の水分によって活性化する導電性テープを原子炉保温槽の外側に設ける方法、

特に軽水炉システムでは温度の条件により、上記(1)(2)の適用性は制約を受け、(3)の方法が特定領域の監視に成功している。

4. 結 論

AE法は原子炉圧力バウンダリの広い領域に亘って、リークをオンラインかつ連続的に監視するのに適し、リークの位置を標定することも可能である。検知可能なリーク流量の限界は $0.1 \sim 0.5 \text{ ml/sec.}$ と極めて高い感受能力があり、応答時間も短い。さらに、リーク流量の変化を音の強度から推定し得る可能性がある。装置も比較的簡単なので、その応用は拡大されるものと期待できる。

本法の発展をはかするには、(1)リーク信号の特徴づけ、(2)センサー配置の最適化、(3)実際の欠陥によるデータの集積、(4)検出限界の明確化、などにつき今後とも研究を進める必要がある。

5. 主な引用文献 (1) Anon, "Reactor Coolant Pressure Boundary Leakage Detection Systems" U.S. A. E. C. Regulatory Guide 1.45, May 1973. (2) M. J. Lighthill "On Sound Generated Aerodynamically" Proc. Roy. Soc. (London) A. 211 (1952) p.564, and 222 (1954) p.1.

6. 評価および問題点

原文	出典	番号	52	頁数		写真		図表	
	題目	Acoustic Emission Testing for Structural Applications	著者	Kanji Ono, et al					
和文	題目	構造物へのAEの応用	所属	University of California					
	抄訳者	松本 陽二	所属	神戸大学	発表月日	年	月	日	
1. 概要									
<p>AE現象について述べるとともに、過去に報告された代表的なAEの適用例(材料評価, 圧力容器, 橋梁, ダム・ゲート, 溶接割れ等)について概説したものである。</p>									
2. 目的									
<p>AE法とその応用の現状について紹介することを目的としている。</p>									
3. 内容									
<p>AEは材料が種々の応力下で変形または破壊する時に解放される弾性エネルギーである。AE波形は、通常、2つのタイプに分けられる。1つは塑性変形による連続型で、もう1つは割れ成長等による突発型である。AE検出にはPZT共振器が用いられている。AE信号は低雑音のプリアンプに送られ、そこで増幅された後振幅弁別装置、AEカウンターおよびRMS電圧計に送られる。大型構造物では多くのセンサーでAE事象を検出し、その検出時間差を利用することによってAE発生位置が決定されている。</p> <p>〔AEと材料強度との関係〕</p> <p>構造用鋼の破壊靱性試験でのAE挙動は材料の強さと靱性に依存している。低強度、高靱性鋼ではノック先端の局部降伏が主なAE発生限であり、延性破壊の伝播時のAE発生はわずかである。一方高強度、低靱性鋼では降伏時と同様に割れ伝播時もAE発生が認められる。線型破壊力学が適用できる時、AEカウント数は応力拡大係数の4乗から10乗で増加している(1)。</p> <p>〔AEの応用例〕</p> <p>AEによる構造物の安全解析は構造物自体を用いて行なわれるが、構造物から切り出した試験片もしくは構造物に取り付けた試験片でも可能である。これにはカイザー効果が重要な役割を果たしている。この効果は1950年代初期にカイザーによって発見され、材料もしくは構造物が以前に負荷された荷重を越えるまでAEを発生しないという不可逆性を表わすものである。</p>									

サンフランシスコ湾にかかっている最も古いダンバートン橋のケーブルについてAE計測を行なった結果、橋のケーブルの寿命は計画した取り換え時期よりも延ばすことができ、多大なかけかえの費用が節約できた(2)。

日本では水力発電のダムゲートのAE計測が行なわれ、構造的欠陥は存在しないことが示された(3)。

溶接割れへのAE法の適用は1960年代中頃から報告されている。溶接後の割れの検出は雑音が少ないので簡単である(4)が、溶接中の計測は難しい。

圧力容器の分野、特に宇宙工学や原子力関係はもっとも広範囲にAE計測がおこなわれている。AE計測は、通常、水圧試験時に行なわれ、割れ成長、溶接のブローホール、介在物層、融合不良およびリーク等が検出されている。

4. 結 論

土木工学関係の構造物を含む多くの分野ではAE計測に関する実例はあまり認められないが、宇宙工学や原子力関係の分野では構造物の安全性評価に対するAE技術適用の可能性が十分に実証されている。今後この技術のメリットを十分に発揮するためには、より以上の開発努力が必要である。

5. 主な引用文献 (1) Proceedings of Second Acoustic Emission Symposium, High Pressure Institute, Japan, Tokyo, 1974. (2) Dunegan, H.L., Harris, D.O., Mat. Eval. 32 (1974) 1. (3) Nakasa, H., "Defect Estimation and Safety of Steel Structure," JSSC 11 (1975) 21. (4) Nishida, K., Ref. 1, Sec. 2, P1.

6. 評価および問題点

原	出典	番号	53	頁数	6	写真	0	図表	7
文	題 目	Continuous Monitoring of Nuclear Reactor Pressure Vessels by Acoustic Emission Techniques.		著者	J. B. VETRANO, W. D. JOLY, P. H. HUTTON				
				所属	Batelle Pacific NW Laboratories				
和 文	題 目	AE技法による原子炉圧力容器の連続監視		抄訳者	中村哲男				
				所属	三菱重工業(株)	発表月日	年	月	日
<p>1. 概 要 AE技法による原子炉圧力容器の連続監視システムを開発がバットル研究所によってなされた。問題は 1. 高温、高放射能環境下耐え 2. 準クリティカルなクラックの位置検定計算のデータ処理システム、3 流音ノイズ下で AE を検出出来るシステムを開発する努力がなされ、解決手段が見出された研究報告である。</p>									
<p>2. 目 的 原子力プラントが人口稠密地付近に増加し、放射線洩れが発生しないよう設計、検査する必要がある。このため圧力容器と一次系配管の健全性を保証する検査システムの開発に関心が持たれ、最終的に運転中の一次圧力システムの状態を連続的・非破壊監視をする努力が払われて来た。このシステム開発のトピックスを紹介する。</p>									
<p>3. 内 容</p> <p>圧力容器のクリティカルなクラックの大きさは数cmであり、準クリティカルサイズの傷の開始と成長を連続監視するため AE の傷の検知と位置検定能力による監視システムの開発が途切られた。</p> <p>(1) 高温(圧力容器外面約315°C) 高熱中性子束 ($1 \times 10^5 \text{ n/cm}^2 \text{ s}$) 対策 圧力容器と機械的インターフェースが信頼性が高いのでウェーブガイド法(図1)が選択された。材質はジルカロイやアルミが適している。検知器PZT やプリアンプはコンテナに入れ、圧力容器から離して耐環境性を得る。ウェーブガイドは約6mまで実用的であり、減衰量は0.7MHzで-1.3dB/m程度である。</p> <p>(2) AE 源位置検定 正六角形トランスジューサアレイパターンがハードウェアの簡単化と計算時間の短縮のために選定された。双曲線の交点計算によるより、トランスジューサの信号到達順序によるセクタ、時間差に依りゾーンを決定するテーブル法が採用された。トランスジューサ間隔は1.5mで、オーバーラップが少なく、円筒、球形にも適用出来るのが好都合。</p> <p>(3) ノイズ対策 流音ノイズに対して周波数フィルタと信号増強法の組合せにより傷の検出が可能になった。San Onofre 炉でのノイズ周波数スペクトル計測結果を図2、図3に示す。ハッチ部分は1.5mからの典型的なAEのスペクトルである。周波数フィルタのみではSN 1.2-1.5を得るためには コールド状態では1MHz以上 ホット状態では0.3MHz以上を扱う必要がある。</p>									

(4) 信号増強法 AEはいくつかの場所で発生するが、発生率が流体ノイズに比して小さいこと、キャビテーションは特定の個所で発生するが、発生率が高いこと、孔流は発生場所がランダムであり、発生率が高い場所であり低いことに注目して、全信号を位置標定し信号処理でランダムな差引けばSNL 1.0以下でも傷の識別が可能である。コイニシテンス検出技術が基礎実験的に確認された。

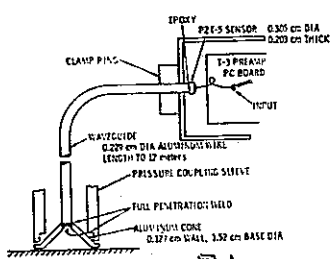


図1

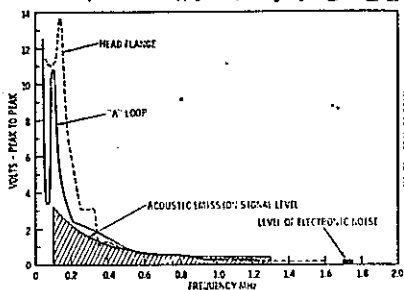


図2.フル・コールドフロー・ノイズ

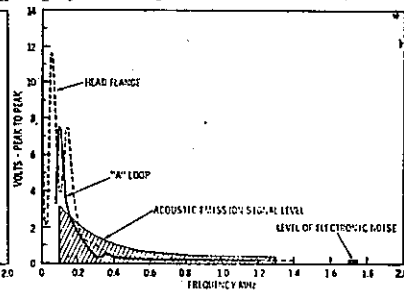


図3.フル・ホットフロー・ノイズ

4. 結論

以上の研究努力の結果、傷の成長に対して、BWRとPWRへAE連続監視を適用するための、基本的な問題に関する解決策が見出された。この基礎研究は、フル全での運転中のセントラルステーション原子炉プラントの連続オンライン監視が現実的となり得る可能性が出て来た。先ずはデモンストレーティブの実験で達成し得る。ここでは大きな容器でコントロールされた傷がシミュレーション運転条件でモックアップであろう。このデモンストレーションは米国で実施途上であり、1972年6月以前に完了予定である。

5. 主な引用文献 "Nuclear Reactor Background Noise vs. Flaw Detection by Acoustic Emission" P.H. Hutton, BNWL-SA-3820, 第8回非破壊評価シンポジウム (1971年), April 1971
 "Nuclear Reactor System Noise Analysis, Presden-1 Reactor, Commonwealth Edison Company" P.H. Hutton BNWL-933, Dec. 1968

6. 評価および問題点

この論文はAEによる運転中の原子炉の連続監視の基礎を築いた点が高く評価される。我が国のAE連続監視技術にも基礎を与えたものであり、既にAEの講習会テキストにも取り入れられている。

原文	出典	8th World Conference on Nondestructive Testing			番号	54	頁数	8	写真		図表	12
	題目	Acoustic Emission Characteristic of Structural Steels			著者	ONO K. HUANG G. HATANO H.						
和文	題目	構造用鋼のAE特性			抄訳者	白岩俊男 (代理 山口久雄)						
					所属	UNIVERSITY OF CALIFORNIA						
					所属	住友金属工業(株)	発表月日		年	月	日	
<p>1. 概要</p> <p>C-Mn 鋼, 4130 鋼及び SA 533 B 鋼の引張り試験及び破壊靱性試験時の AE 挙動について調査した。その結果、非金属介在物が突発型 AE の主たる発生原因であることがわかった。</p>												
<p>2. 目的</p> <p>AE 信号とその AE 源の物理的過程を関係づけるために、周波数解析、振幅分布解析を使用して構造用鋼の AE 源を調査する。</p>												
<p>3. 内容</p> <p>3 種の鋼材を使用して引張り試験と破壊試験を行い、AE 信号特性を調査した。センサには共振型及び広帯域型の 2 種のもので使用され、記録には 2 台のデータレコーダが使用された。AE カウント及びその依存性、AE 信号波形、周波数スペクトラム、RMS 電圧が AE 特性の評価に使用された。</p> <p>(1) C-Mn 鋼の引張り試験</p> <p>圧延方向、圧延直交方向及び厚み方向の引張り試験を行った。圧延方向及び圧延直交方向の試験では AE 活動性は S 成分の変化により影響を受けず、AE 波形はほとんどが連続型であった。一方厚み方向の試験では、AE 活動性は S 成分が高くなるほど活発となり、又突発型 AE の数も増加した。両者は周波数スペクトラムでも異なっていた。</p> <p>(2) 4130 鋼の引張り試験</p> <p>5 種類の熱処理を施した板引張り試験片が使用された。球状化されたマイクロ組織をきつものはリレーゲース帯の拡大中に AE が少し出る程度であった。が、炭素試験片では巨視的階状の 1/2 から AE 活動が始まり、階状点でかなり大きくなり加工硬化のほどもで減少したが試験中ずくと残存した。</p> <p>(3) 考察</p> <p>厚み方向試験片で観察される突発型 AE は、MnS 介在物の分離から起こることは確かである。又フェライト-パーライト、フェライト-カーバイド組織の塑性変形は C-Mn, 4130 鋼で連続型 AE のみを生ずる。</p>												

(4) S A 5 3 3 B 鋼の引張り試験及び破壊靱性試験

鋼板 (EAB, CEB) と溶接部 (CGS) の3種の材料 (それぞれのNDTは78°C -10°C -57°C) から試験片が作られた。CEB, EABの引張り試験ではAE活動は降伏応力の約1/2から増加しはじめ降伏点の85%でピークに達しそのピークはロードス帯拡大中に維持され減少した。CGSではAE活動は低かった。波形には突発型AEが含まれこれは大きな介在物に起因していると思われる。

コンパクトラニオン試験片でのAEは材料と試験温度により異なつた。振幅分布解析結果には大きく分けて2つのタイプがあつた。これらの結果より破壊靱性試験でのAEはストレッチゾーンで起るポイドの合体による小振幅の突発型AEと介在物の分離もしくは破壊から発生する大振幅突発型AEの2種類があると考へられる。

4. 結 論

この研究は、非金属介在物の分離 (及び破壊) が突発型AEの重要な発生源の一つであることを示した。又、信号波形、振幅分布及びトランスデューサの励振モードはそれらの特徴付けに適している。

AE発生機構のより詳細な理解には、材料特性を知らずの可利用できる手段とこれらのテクニックの十分な利用が必要である。

5. 主な引用文献

6. 評価および問題点

III 論 文

3.1 構造材料のA E基本特性

原子炉にA E法を適用するにあたっては、ノイズレベルとも関係してA E振幅の大きさが重要な要素の一つとなっている。A E振幅は、材料、温度のほか力学的要件などによっても変化するものと思われる。以下には、これらを考慮して、静負荷、疲労負荷および応力腐食に分け文献により調査した結果をまとめた。

3.1.1 静負荷試験による材料特性

(1) SUS304のA E特性

平滑材の引張り試験におけるA E特性は、図1に示されるように温度依存性を示している。実際に近い分岐管で疲労実験を行った図2の結果と定性的に合っている。どの温度においても、降伏点近傍においてのみA Eは観察されており、加工硬化領域ではほとんど観測されていない。又、測定温度の上昇と共に、RMS電圧が上昇しているのが特徴である。これらのA E信号に酸化物等雰囲気の影響はほとんどないことが確認されている。図2は、このA E信号のリングダウン計数の振幅分布を示したものである。横軸は、しきい値電圧 V_t を $\frac{1}{2}$ 乗尺にプロットしてあり、outputを示している。その積分モード振幅分布 $I(V_t)$ は、次の形で整理されている。

$$I(V_t) = k_0 \exp(-a \cdot V_t^{\frac{1}{2}})$$

又、観測された、オシロスコープ上の波形は突発型成分の多いものであった。

図3によればA E振幅は、少なくとも、22℃ではプリアンプ入力換算95 μV 、460℃で160 μV の大きさとなっているが、数は少ないのが特徴である。

図4は、カイザー効果の結果の一例である。SUS304では除荷時にA Eが観測され、それ故にカイザー効果は明瞭には現われな。カイザー効果は、除荷時の塑性歪の大小と密接に結びつくものであり、応力反転時のハウシンガー効果に伴うA Eピークを解析して得られたバックストレスの大小で評価できる。バックストレス20%~25%を境にして、それより大きいものではカイザー効果は成立しにくいと云える。(以上 FAE 45)

(2) 2 $\frac{1}{4}$ Cr-1Mo鋼のA E特性

平滑材の引張り試験におけるA E特性は、図4に示すように、QT材の弾性域と思われる非常に低応力でA Eが観察されている。又、応力反転に伴うA Eピークが見られる。図6は、この降伏点近傍のA E振幅分布を図4と同じ方法で整理したものである。QT材は、NT材に比べて、A E振幅は大きく、プリアンプ入力換算250 μV のものが計測されている。

環状切欠きに疲労予き裂をいれた丸棒試験片による引張り破壊靱性試験の結果は図7のような結果を示している。Pop-inの開始よりかなり前にA Eが生じていて、安定き裂の成長が既に生じている可能性があるが、き裂進展に関しては不明である。(以上 FAE 46)

(3) A E発生と金属組織との関係

C-Mn及び4130鋼の実験結果では、フェライト-パーライト、フェライト-カーバイド組織

の塑性変形は、連続型 A E 信号のみを発生している。この場合、フェライト中の転位運動、カーバイド界面の分離、カーバイドの破壊は A E 信号によって分離されていない。(FAE 54)

2 ¼ Cr-1 Mo 鋼は、耐熱性を考慮して作られた材料で、化学反応容器向の NT 材ではフェライト-パーライト組織であり、原子炉用では、60 キロ級 QT 材が用いられ、焼戻シマルテンサイト組織もしくはペーナイト組織となっているものと思われる。FAE46 によれば、A E 信号は突発型の成分が多く発生しているようなので、FAE54 の連続型の結果と異なっている。したがって、金属組織からかならずしも A E 発生を推測することはできなく、各々の材料についてそれぞれ A E 特性を知る必要がある。又、一方では、連続型、突然型などに分けることに意味がないという意見もある。

3.1.2 疲労負荷試験による材料特性

(1) 疲労き裂先端での塑性変形

き裂先端においては、ある段階をとれば、図 8 のごとくなる。疲労き裂は大きく塑性変形した領域とその外側に小さく塑性変形した領域によって囲まれている。ここで内側の大きく塑性変形している部分は、荷重の除荷時においてもバックストレスにより塑性変形を起こし得るところで、パウジンガー効果を考慮しうるところである。その外側の塑性変形領域は、き裂の先端が到達した直後の最初の ¼ サイクルで生じたものと考えられる。

塑性変形による A E の発生は、き裂が進展し新しい塑性変形をうける部分の最初の 1 サイクルにおいて顕著であると思われる。新しい塑性変形量はき裂の深さによって増加するもので、平面応力、平面ひずみの状況、加工硬化の程度、温度の影響などを含めて、破壊力学的にはかなり解析しうるものと思われるが、A E 信号との関係については、データが少ない。すなわち、き裂の深さの効果が、A E 振幅または A E 発生量にどのように影響しているのか不明の部分が多い。

(2) 自由表面の形成

自由表面の発生形態は、き裂の深さ(面積とも関連)すなわち、き裂先端の応力状態によって異なる。き裂が浅い場合には、き裂先端のスぺリによって新しいき裂面が形成され、本質的には塑性変形の A E 発生機構になっているものと思われる。き裂が深くなれば、き裂先端よりも深いところにボイドの形成およびボイドの結合現象が起こり、新しい自由表面の形成となり高い振幅の A E 源となる可能性がある。2 ¼ Cr-1 Mo 鋼 (FAE-36)、C-Mn, 4130 鋼、A533B 鋼 (FAE-54) の破壊靱性試験における結果で高い振幅の A E が発生していることと類似している。又、Aℓ 合金 (Aℓ Mg 5) の曲げ疲労破面のフラクトグラフィ解析による結果でも、高い振幅の A E の発生源となるのは、スロークラックの成長であると言われている。(FAE 42)

(3) き裂面のこすれ、さびのはがれ

疲労試験の結果によれば、片振り引張荷重をうける疲労き裂面の変位を荷重 1 サイクルに対して測定したところ、疲労き裂は最大引張荷重から 50%~80% 除荷されたとき、その先端から閉じ合わさることが確認されている。

この閉じ合わさる時に A E 信号が発生するとすれば、この二次的 A E 信号を観測しても割れの確

認に役立つものと思われる。き裂面のこすれのみを分離したA Eデータはないが、F A E - 3 6の軟鋼中の疲労の伝播でA E信号が確認されていないことは、材料によってはき裂面が閉じるときのA Eはなく、こすれも起こっていないと推定される。

き裂先端の底に錆が発生し、繰返し荷重の過程で錆がはがれるA Eも期待できるがこの場合にはき裂先端の底に錆が発生するまでの適当な休止時間が必要と思われる。

3.1.3 応力腐食割れ

(1) S U S 3 0 4

軽水炉の結果であるが、実際に近い溶接継手部および環境条件での応力腐食試験の結果、割れの発生から貫通漏れまでの過程で、割れの進展状況に応じたA Eレスポンスがあることが示され、軽水炉へのA E法の適用の可能性を示している。

また、1日1回だけ減圧、再加圧させ、粒界応力腐食割れ自体からだけでなく、繰返し荷重時の割れ先端のこすれ、酸化被膜のはがれなど2次A E源の効果の大きいことも示されていた。(F A E - 3 5) A E振幅の大きさについての考察がないため、現場への応用には、はっきりしない要素が多い。

(2) S U S 3 1 6

高速炉では、化学的反応によって、苛酷でかつ高陰イオン濃度状態がおこりうる可能性がある。この状態に注目し小形試験片によって応力腐食割れ試験を行った結果、損傷は容易に検出されることがわかった。(F A E 4 9) しかし、A E振幅の低か、現場への応力には、実機に近い状態での実験が必要と思われる。

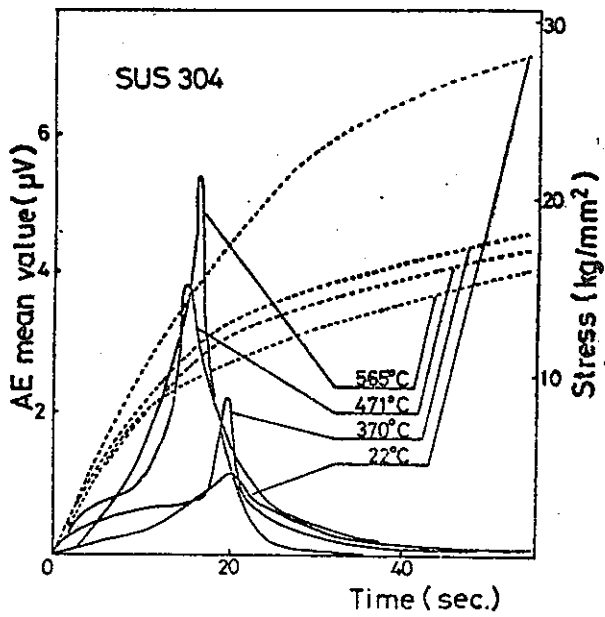
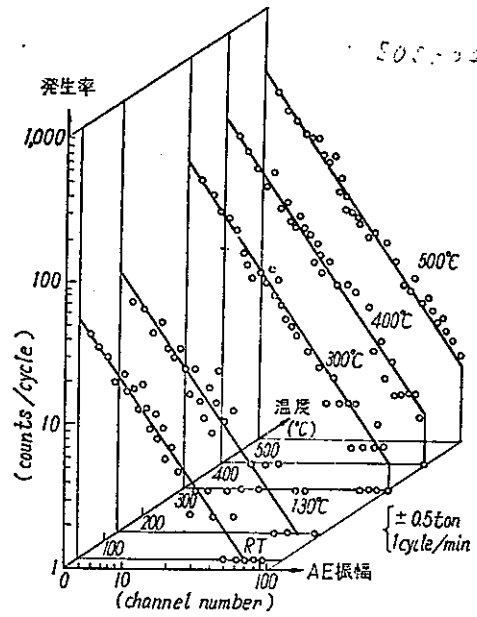


図 1.



AE 振幅分布の温度依存性 (分岐管)

図 2.

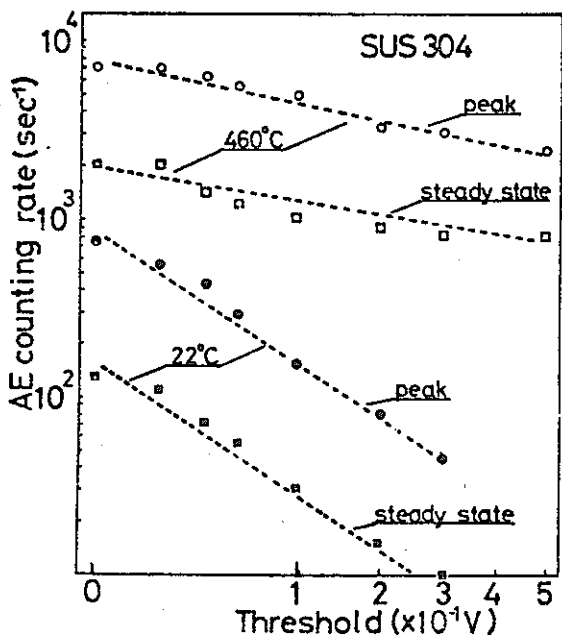


図 3.

	Kaiser Effect	mean back stress
Al		16 %
Cu		15 %
α Brass		22 %
SUS 304		37 %

図 4.

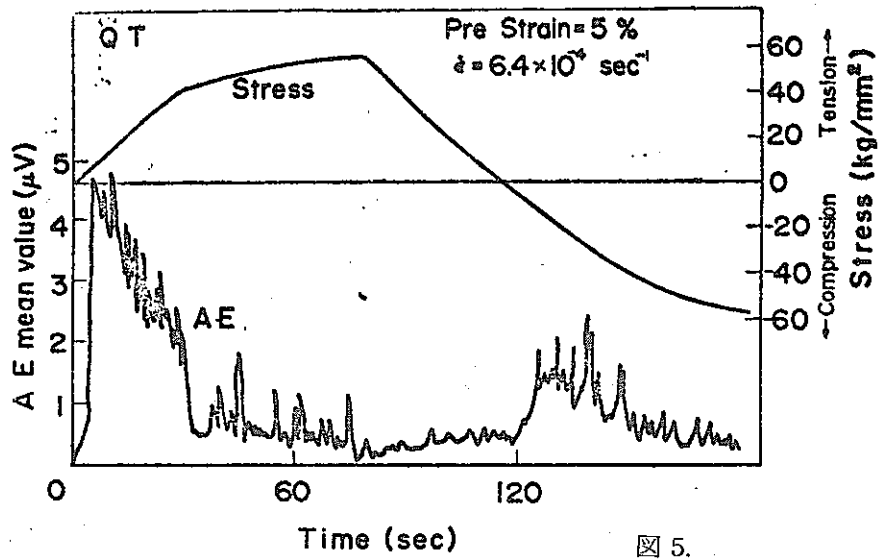


图 5.

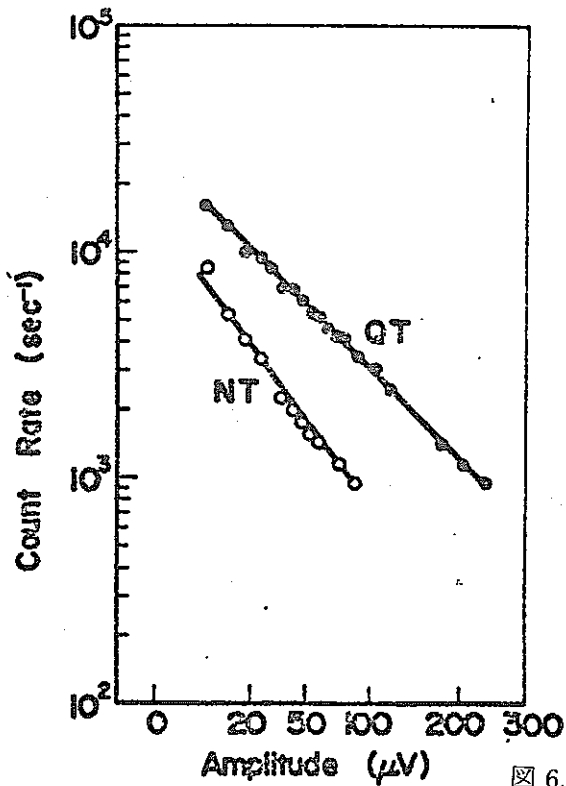


图 6.

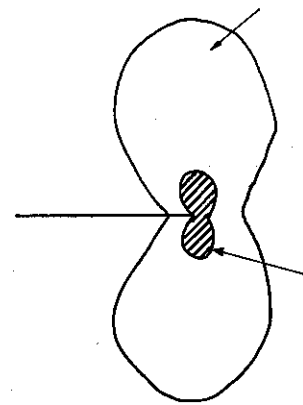


图 8.

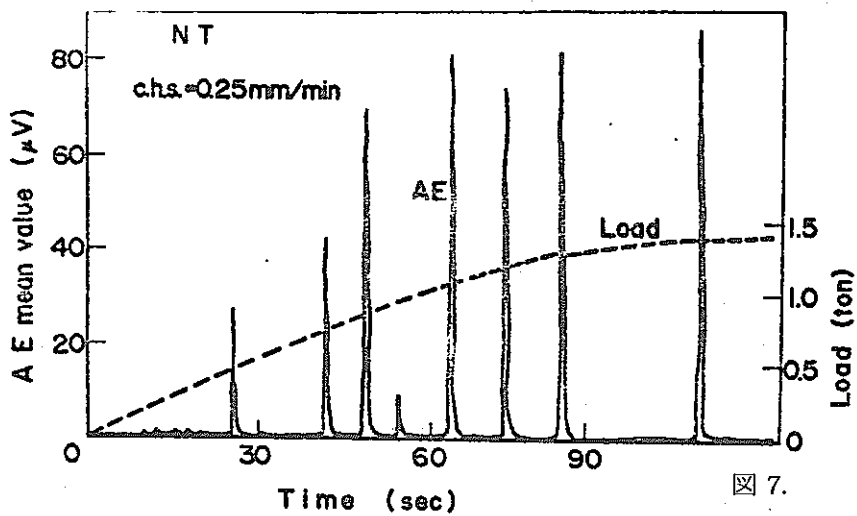


图 7.

3.2. 変換子, 導波棒

FBRのAE監視の目的に使用するAE変換子には, 特に高度の耐環境性と信頼性が求められる。しかし, FBRへのAE法適用の実績が皆無に近い現在, 実用上の要件を完全に満足する変換子を実現するには, まだ若干の改良を必要とする。AE変換子の性能が, FBRのAE監視の成否を決定する要因の一つになると考えられるだけに, 今後一層の開発努力が必要になるであろう。また, AE変換子の特性を評価し, 異なったシステムで得られたデータの比較の基準となる校正法の確立も並行して進められなければならない。本稿では, FBRに使用するAE変換子とその感度の校正法に關係する従来の研究について, その概要に触れる

3.2.1 高温用AE変換子

FBR用の変換子では, 感度や周波数特性の他に, 耐熱性や耐放射線性が重要な問題になる。

常温での使用を目的としたAE変換子の場合, 変換子素子材料として圧電セラミックが用いられることが多い。しかしそのキュリー温度は300℃前後であり, FBRの使用条件(最高550℃)に比して低い。表1は, 比較的高いキュリー温度を持つ圧電材料の特性を示したものである(FAE-30)。キュリー温度が1,200℃と高く, 比較的変換効率が良好であることから, LiNbO₃(ニオブ酸リチウム)が, FBR用AE変換子素子材料の第一候補として挙げられる。

LiNbO₃の耐放射線性について, 直径10mm, 厚さ1mmの単結晶をバンドグラフの電子線で照射し, その影響を調査した結果が報告されている(FAE-31)。表2は, 1.3MeVの電子線によって照射実験を行った結果の例である。試料によっては約7%の電気機械結合係数の減少が認められるものの, FBR内のγ線200日分の照射では顕著な特性の変化が生じないため, 実用上の支障はないであろうとの結論を得ている。

表1. 圧電材料の特性

Material	Curie Temperature °C	Piezoelectric Charge Coefficient d, 10 ⁻¹² C/N
Quartz ⁹ [SiO ₂] X-cut	576	2.3
Tourmaline ⁹ [Al ₂ O ₃] Z-cut	980	-1.8
Lithium Niobate ^{10,11} [LiNbO ₃] Z-cut	1210	16.3* 6
Lead Metaniobate ^{1,2} [Pb(NbO ₃) ₂]	570	90

* Value used in this study

表2. LiNbO₃ 単結晶の1.3 MeV電子線による照射効果

Specimen ^a	Dose		Dilatation		Optical Absorption at 0.48 μ		Electromechanical Coupling Factor k_{33}	Relative Dielectric Constant ^d $\epsilon'_{33}/\epsilon_0$
	($\mu\text{C}/\text{cm}^2$)	(MR)	Orig. ^b (10^{-5})	Aged (10^{-5})	Orig. ^c (OD/mm)	Aged (OD/mm)		
PC-6	0	0					0.186	24.3
PU-7	9.5	2.7					0.174	24.3
	907	259				0.055 ^c	0.177	23.8
PU-8	115	33					0.181	23.2
	9 058	2591				0.064 ^c	0.177	23.2
	27 665	7912			0.103			
PH-5	8.8	2.5						
	85	24		+0.9 ^e			0.183	
PH-4	4.5	1.3	+2.1		0.049		0.189	23.2
	20	6	+2.8		0.053			
	49	14	+2.7	+1.5 ^f	0.049	0.035 ^g		
SC-3	0	0					0.148 ^h	24.3
SH-2	3.9	1.1	-1.4	-1.4 ^f	0.045		0.138 ^h	24.6
SU-1	9.3	2.7			0.032		0.144 ^h	24.6

^aP, a high phase match material; S, stoichiometric material; U, uniformly irradiated; H, half of face shielded from electrons; C, control.

^bWithin 1 $\frac{1}{2}$ h after irradiation.

^cWithin $\frac{1}{2}$ h after irradiation.

^dNot corrected for possible series air gap (see text).

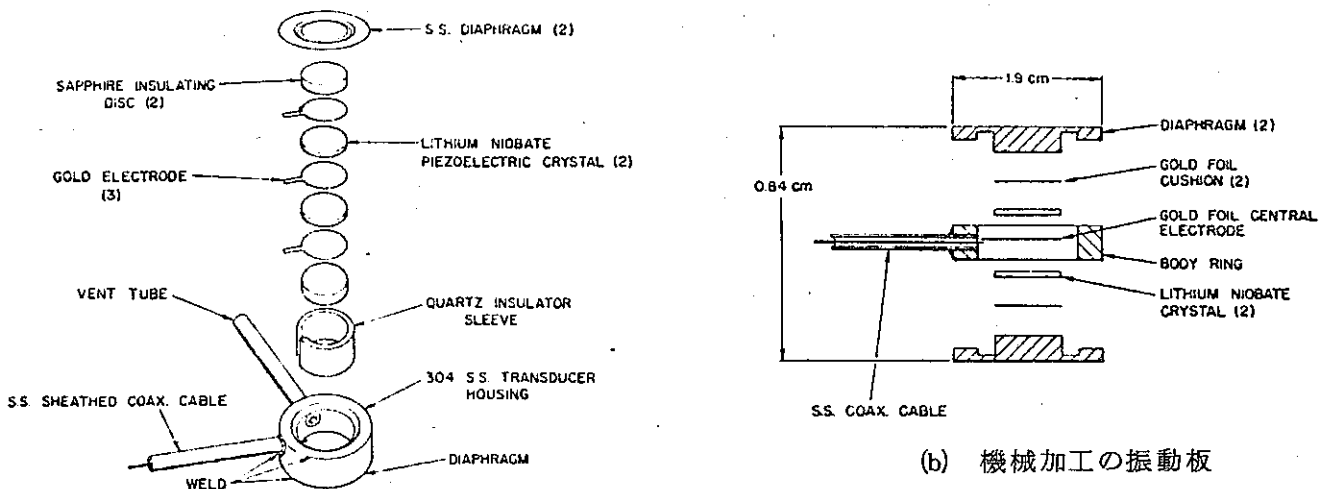
^e3 $\frac{1}{2}$ weeks after irradiation.

^fTwo weeks after irradiation

^gA day after irradiation.

^hA month after irradiation; remainder of electrical measurements within 1 $\frac{1}{2}$ h.

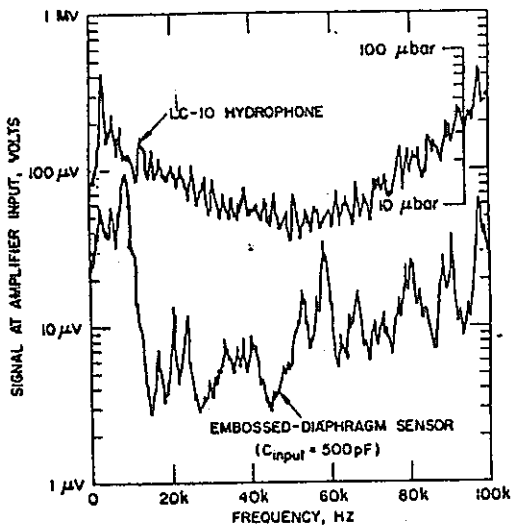
FBRの沸騰音検出の目的に、LiNbO₃ 単結晶を変換子素子として用いた長漬型の変換子が開発されている (FAE-30)。図1はその構造を示したもので、同図(a)は押し出し加工による薄い振動板を使用したもの、(b)は機械加工による振動板を使用したものである。液体金属と接する部分は総てSUS304ステンレス鋼製で、同軸ケーブルはMgOで絶縁してある。温度の上昇に伴って変換子内部の気圧が上がるのを防ぐため、密封構造とはせず、換気用の細管を併用している。



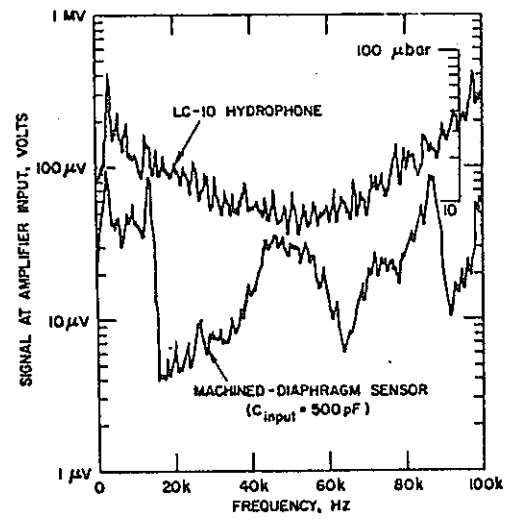
(a) 押し出し加工の振動板

(b) 機械加工の振動板

図1. 長漬型変換子の構造



(a) 押し出し加工の振動板



(b) 機械加工の振動板

図2. 浸漬型変換子の特性

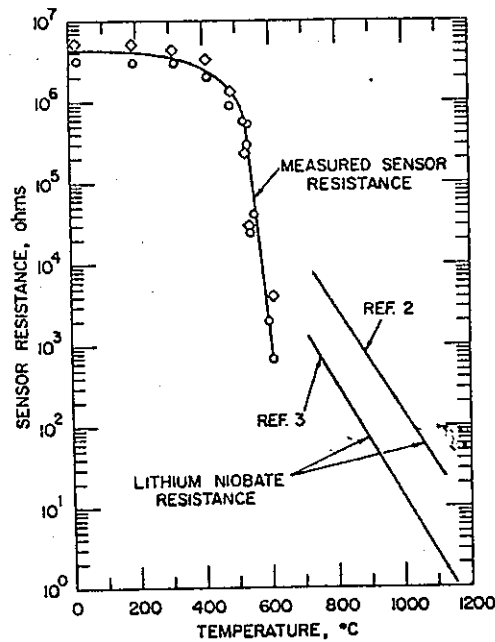


図3. 変換子の電気抵抗

図2は、水中で測定した変換子の感度の周波数特性である。可聴周波数域のピークは、変換子容器の共振によるものと考えられる。20 KHz 以上の超音波周波数域では、振動板の差異による特性の差が顕著である。図3は、100 °Cステップで600 °Cまで変換子を加熱したときの、変換子の電気抵抗の変化を測定した結果である。LiNbO₃ 単結晶単体の場合に比して、温度上昇に伴う電気抵抗の低下が著しく、この変換子の使用可能温度の上限は、一応540 °C程度に制限される。

図4は、原子炉パウンダリの供用期間中検査などで、AE検出を行う目的に開発されたAE変換子の例である(羽田野:配管と装置17巻7号17頁(1977))。変換子素子には、1000 Fの耐熱性を持つという圧電材料を用い、変換子本体を直接被検体の表面に、磁石を利用した治具で取りつ

けて使用する。変換子の出力信号を、原子炉格納容器の外側に取り出すため、インピーダンス変換用のトランスを組み合わせ、既設の熱電対ストレングージ用の貫通端子が利用できるように工夫されている。この変換子は、Dresden 炉 (BWR) や Calvert Cliffs 炉 (PWR) での実験に使用した実績がある。

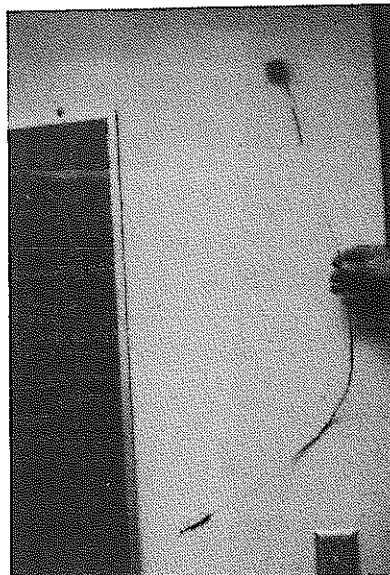


図 4. 原子炉用 A E 変換子

3.2.2 A E 導波器

A E 変換子を、苛酷な環境の被検体に直接取り付けるのが適当でない場合、金属製の棒や管を用いた機械的導波器が併用される (FAE-17)。

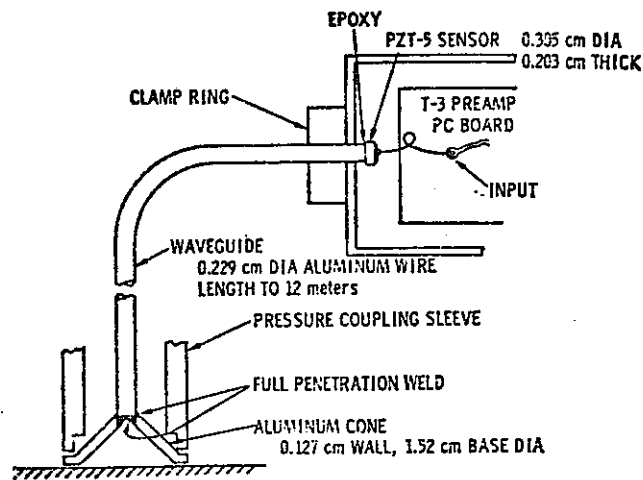


図 5. A E 導波器

図 5 は、PWR あるいは BWR の A E 検出のために開発された導波器付きの A E 変換子の例である (FAE-53)。導波器本体は、音響損失の小さいジルカロイやアルミニウム製の細い棒または管からなり、その一端はホーン状に加工されている。このホーンは、炉圧力容器の表面に溶接あるいは圧着して使用される。導波器の他端に、圧電セラミック振動子を接着して変換子としている。ケ

ニプルによる損失を抑えるため、プリアンプは振動子に近接して、同一ケース内に設置した。この導波器の減衰は、0.7 MHzで-1.3 dB/mと僅少であるので、約6 mまで導波器の延長が実用上可能である。

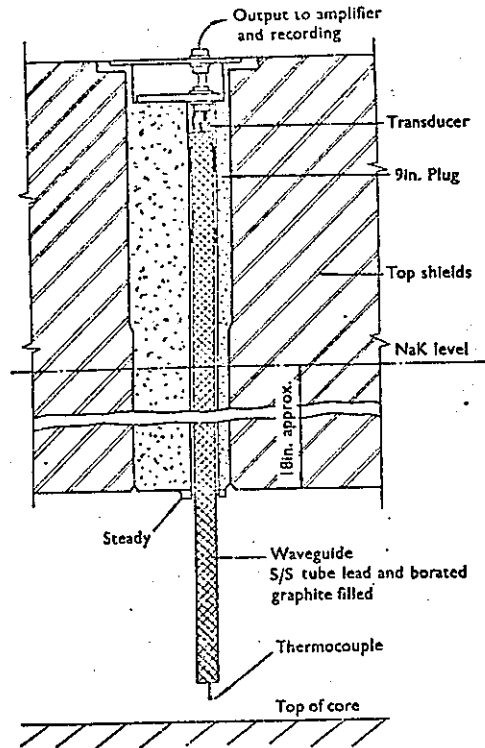


図6. DFRの導波器

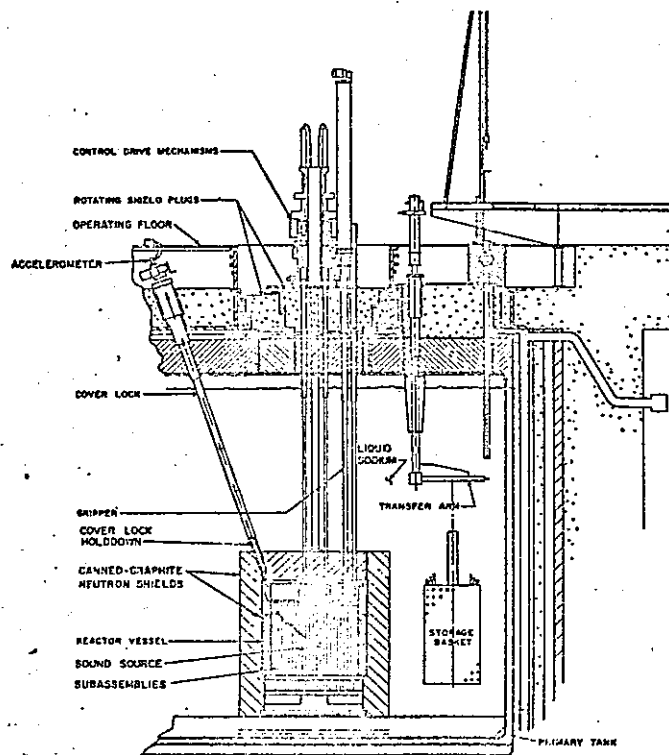


図7. EBR-IIにおける音響監視

図6は、DBRの沸騰音検出に使用するため開発された導波器の実例である (FAE37)。

一方、特別の導波器を用いなくて、炉構成部材に導波器としての機能を受け持たせた実験も報告されている (FAE-18)。図7は、EBR-IIの大型ナトリウムシステムの一次系の音響監視を行った例である。共振周波数125 KHzの加速度計は、ホールドダウン内の直径3 inのタイロッドの上部に取り付けられ、またタイロッドの下部は、炉容器の上端に恒久的に取り付けられている。炉心よりの音波は、ホールドダウンを経て加速度計に伝達されるようになっており、この監視システムでは、ホールドダウン、タイロッドが導波器としての作用をする。

3.2.3 AE変換子の校正

AE変換子の特性を検討するため、従来は擬似AE音源によって変換子を励振したときのレスポンスを計測する方法が多く用いられてきた。この音源としては、電気スパークやサンドブラストによるランダムな雑音や、ガラス細管の破壊に伴うパルス音などが利用されている。図8の例では、SiCのパウダを、熔融石英の棒で砕くことによって、広い周波数分布を持った音源を得ている (FAE-14)。

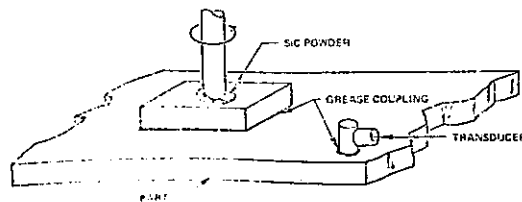


図8. SiCパウダの破碎による擬似AE音源

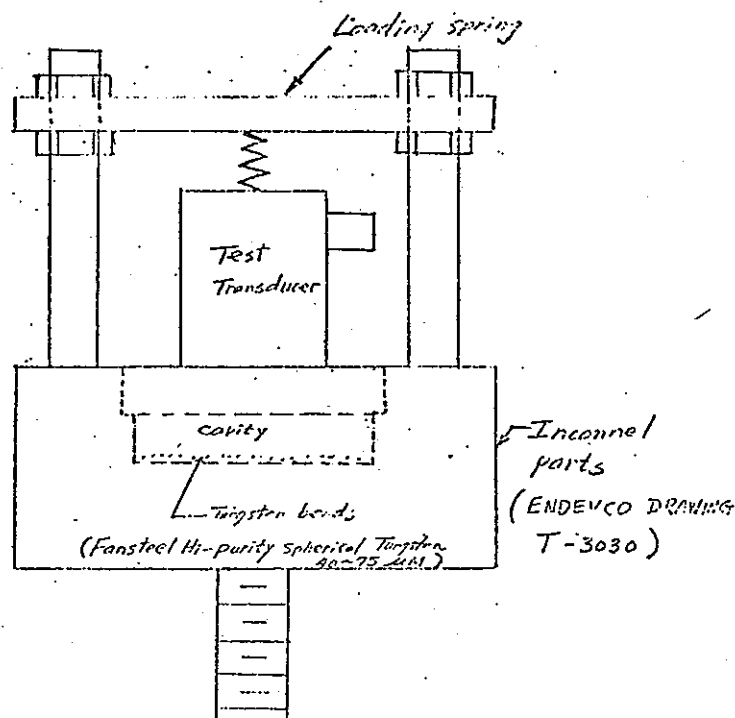
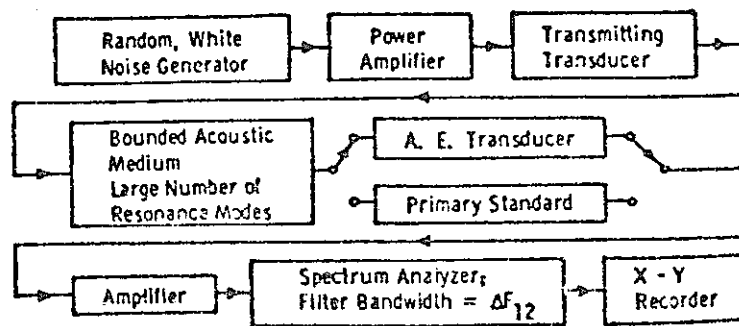


図9. タングステン粒の振動による擬似AE音源

図9は、広い温度範囲にわたって、A E変換子の特性を測定するために開発された装置を示す (FAE-21)。インコネル製のテストヘッド内の空洞にタングステン粒子(40~75 μ m)を入れておき、下からシェーカーヘッドを振動することによって音を発生する。テストヘッドの部分チェンバに収め、試験温度を-300F~1000Fの範囲で変えられるようになっている。タングステン粒子の大きさ、シェーカーヘッドの振巾、周波数などが、変換子のレスポンスに与える影響も調査したが、0.1~1MHzの周波数範囲内で、顕著な変化は認められなかった。

以上の方式で採用された擬似A E音源は、いずれも大きさの絶対値や周波数スペクトルが既知ではないので、校正の一次標準としたり、変換子の絶対感度を決定する目的には直接使用し得ない。



The Calibration is Valid Under the Following Conditions:

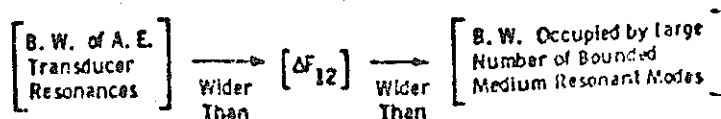


図10. 拡散音場におけるA E変換子の校正

図10は、A E変換子の縦波に対する絶対感度を求めるために考えられた鋼鉄製ブロック内の拡散音場を利用した校正法を示す (FAE-19)。この校正法の根拠となる残響室の理論では、一様音場は室の中心近くだけに存在するのに対し、鋼鉄製ブロックではこの位置での測定は不可能であるので、表面での測定という妥協が行われている。25.4×20.2×16.0 cmの直方体ブロックを用いた場合、その表面の変換子の位置が校正結果に及ぼす影響は±1 dB以内であった。

大型の圧力容器では、A E波の主要な成分は表面波のモードで伝搬する考えられるので、実際の使用状態におけるA E変換子の特性を再現するためには、縦波に対する感度だけを求めたのでは不十分である。この点を考慮して、表面波音場における相互校正法を用いたA E変換子の絶対感度校正法が考案された (H. Hatano and E. Mori : J. Acoust. Soc. Amer. Vol. 59, No. 2, P. 344 (1976))。図11は、この校正の手法を示し、図12は、直径8 mm、厚さ2 mmの圧電セラミック振動子を用いたA E変換子について、その絶対感度を0.1~1 MHzの範囲で求めた例である。この変換子の縦波に対する感度のピークは、1 MHz付近に存在すると考えられるのに対し、表面波が変換子面内で打ち消し合う効果によって、400 KHz以上の周波数で感度が急激に低下しているのが判る。この校正法によって、実際の使用状態におけるA E変換子の絶対感度が、良好な再現性をもって決定された。

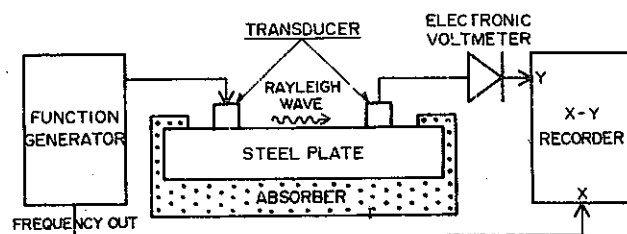
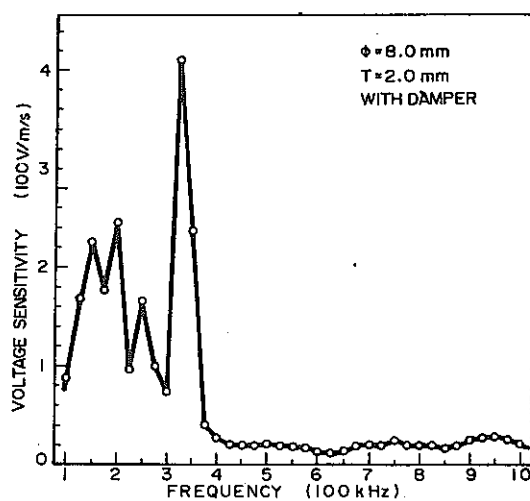


図 1.1. 表面波による AE 変換子の絶対感度校正



Voltage sensitivity of the practical transducer.

図 1.2. 表面波に対する AE 変換子の絶対感度の例

3.2.4. 結 言

導波棒使用の手法により、又高温変換子の使用により、現在、変換子は F B R の監視に使用可能な段階に到達していると思われるが、連続的に使用し得る AE 変換子のより一層の改良、発展を達成するためには、今後とも次のような問題を解決して行く努力が要求されよう。

- (1) 耐熱性、耐放射線性及び変換子としての感度が優れた変換子素子材料の開発。
- (2) 変換子として最適な構造、大きさ及び材質の決定。
- (3) 伝送損失と歪の小さな機械的導波器の開発。
- (4) 被検体への変換子や導波器の取り付け方法の検討。
- (5) 変換子出力電気信号の外部への導出方法に関する検討。
- (6) F B R における使用状態を再現した条件における、AE 変換子の絶対感度校正法の確立。

3.3 環境雑音

A E法で運転中の機器を監視することへの実用化が、A E法適用の最終目標として各方面で研究開発され、これに対する期待も大きいですが、いまだ克服すべき多くの問題をかかえている。とくに、稼働中の設備は一般に、製作直後あるいは定期検査時と比べて非常に強い外来の機械的や電氣的雑音の影響下に置かれるとともに、その設備自体の内部からも流体の流動雑音、キャピテーション、沸騰などの稼働に伴う各種の雑音が発生している。このような高い雑音レベル下で、如何にして目的のA E信号のみを選択し抽出するか、ということが最も重大な問題である。

A E現象そのものの本来の適用方向ではないが、A E信号の検出にとっては妨害となる環境雑音を逆に測定対象とした、音響診断による監視法の適用も広く検討されている。この場合も他の環境雑音との弁別が最も基本的な問題となる。

また、環境雑音と弁別すべきA E信号そのものの特性も、その発生メカニズムと関連させて明らかにされなければならない。とくに、三次元的形状をもつ各種構造要素中の伝播・減衰特性を調べることが実用上重要である。

以下には、これらの問題点について文献調査した結果をまとめて述べる。

3.3.1 環境雑音スペクトラム

F B R環境もしくはF B R類似環境における環境雑音のスペクトラムの計測例として公表されているものはまだ見当たらないが、稼働中の原子炉に関するこの種の調査は比較的よく行なわれており、図1はその一例を示す。

B W Rの0~700KHz の環境雑音スペクトラムを正規化し、P W Rのデータと比較した。(F A E-13) 500KHz 付近がA Eにとって関心の深い周波数領域で、この付近でのP W Rの乱流とキャピテーション雑音はほぼ0 dB (10 μ V センサー出力)で、B W Rの雑音レベルは種々のモニタリング箇所でも0~15 dBであった。A E信号は0~20 dBのオーダーであるから、P W Rの環境雑音にかくれてしまうことはない。これに対して、B W R環境雑音は場所によっては弱いA E信号を消すが、場所によっては観測可能である。

A E信号レベルを20 dB 程度と想定しているが、一概にこの数値を信頼してよいかどうかは、今後検討を加える必要がある。また、F B R環境雑音の計測をまたなければならないが、レベルとしてはB W Rよりはるかに静かと予想され、A E監視の障害は少ないものと考えられる。

3.3.2 雑音による音響診断

各種雑音の計測により、異常検出を主目的とした音響診断技法の原子力プラントへの適用も広く検討されている。

高速炉の炉心流路の閉塞に伴う冷却材異常沸騰の異常診断法に関して調査した結果では、沸騰検出に利用される炉雑音のうち、中性子雑音および温度雑音は環境雑音が大きく困難であり、音響雑音が最も有望視される。問題点としては、ポンプからのキャピテーション雑音との分離があげられる。(F A E-12) また、沸騰検出の二つの方法として、中性子雑音法と音響雑音法を比較した結果では、環境雑音が低い理想的な場合には、後者の感度は前者の少なくとも $10^3 \sim 10^4$ 倍である

ことが示された。(FAE-20)

Na-水反応の際に生ずる可聴域雑音には、frying noise と水素バブルの振動音の2種があり、それぞれ周波数スペクトラムに特徴があることが実験的および理論的に示された。これらの結果により、Na-水反応を音響的手段で検知することによりFBRにおける蒸気発生器の異常を監視する方法が有望視される。(FAE-16)

原子炉内部での沸騰の状態、リークあるいは温度、液位、圧力、中性子束などの変化を音響信号として検知し、かつこれらを環境雑音に対して識別できるようにすれば、外部にてその変化の監視が可能になる。(FAE-37)このためには、水、重水、Naなどの沸騰のスペクトラムあるいは信号の特徴を明らかにする必要がある。将来これらの音響監視技術が、原子炉やプラントの異常検知に利用される可能性がある。

3.3.3 AE信号の伝播・減衰特性

実際のAEの応用では、図2(a)のように弾性波が半無限体とみなせるように大きい被験物の中を伝播することは少なく、むしろ高圧容器のように広い板の中を伝播することが多い。したがって、AE波は図2(b)のように境界面の間で多重反射を繰り返しながら伝播する。しかも反射のたびに横波と縦波の相互間にモード変換がある。このようにいわゆる被導波は、単一周波数の連続波に対してさえかなり複雑な特性を有しているが、ましてAEのような過渡的現象では非常に複雑である。

AE信号の広範囲な周波数分析を行なった結果では、周波数成分はAE発生メカニズムと関連するが、試験片寸法や構造物の多重反射によるモード変換にあまり影響を受けないことが示された。また、多くの材料のAE信号は少なくとも2MHzまではほぼホワイトノイズとなる傾向にあるが、周波数スペクトラムに特徴のあるケースもいくつか観測され、周波数スペクトラムの違いによって、外部雑音と欠陥からのAE信号を区別できる場合もかなりあった。(FAE-14)

AEの伝播に対してもう一つ考慮しなければならないのは減衰である。これも波が四方に広がっていくための広がり損失と固体の内部の摩擦による損失とがある。前者は周波数に関係せず大きな固体では球面波、板では円筒波の減衰になり、前者の振幅は距離に反比例し、後者の振幅は距離の平方根に反比例する。一方、内部摩擦による減衰は高周波ほど急激に大きくなる。したがって波形の周波数分析を行なえば、伝播距離が増すほど高周波成分が欠除していくのがみとめられる。大型の鋼製圧力容器におけるこのような伝播減衰の測定例を図3および図4に示す。(FAE-14)

このような基礎的研究は、AE発生源メカニズムの確認と、その動作に関連する物理的パラメータを求めるため、また、AE信号とその他の外部雑音とを分離する方法を開発するためにきわめて重要であるが、研究事例が非常に少ないのが現状である。

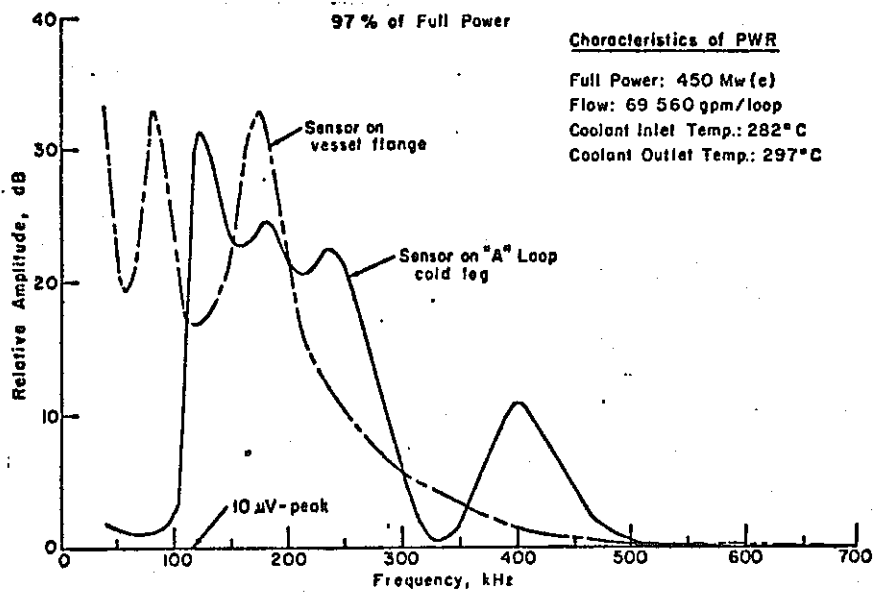
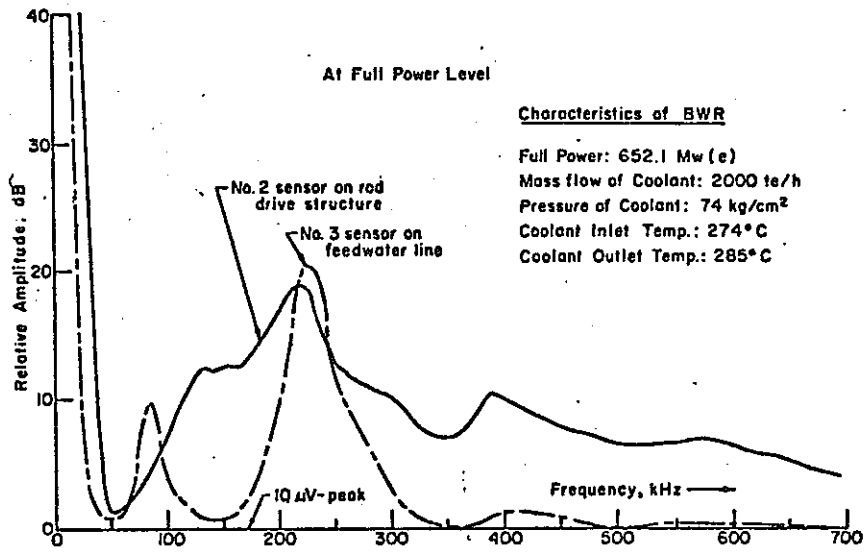


図1. BWRおよびPWRにおける背景雑音の測定例

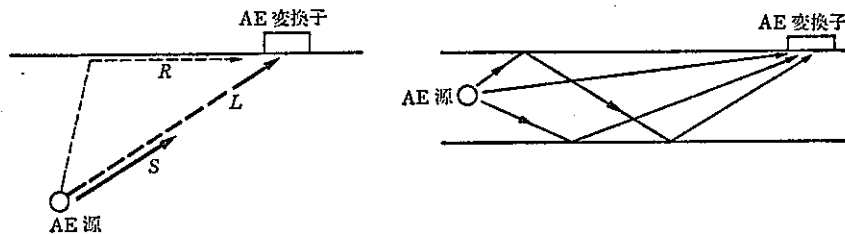


図2. AE源からの伝播特性

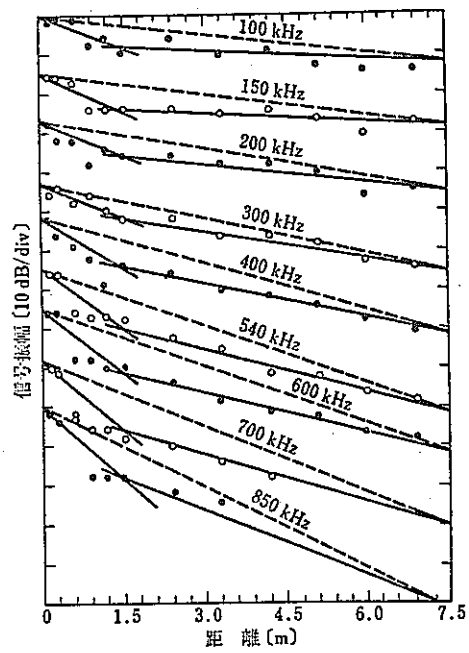


図3. ガス圧力容器における擬似A E波の伝播減衰

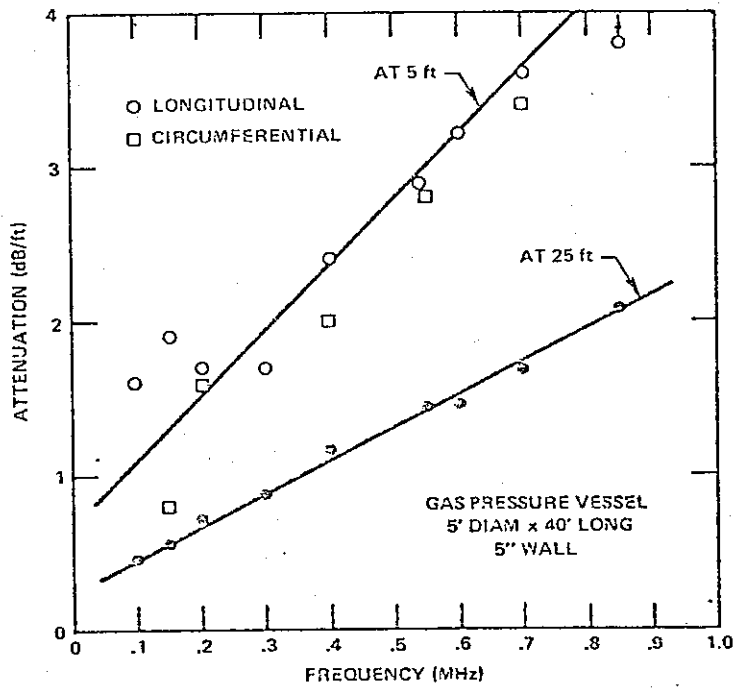


図4. ガス圧力容器における音響減衰特性

3.4 信号処理

AE計測装置は、一般に、AE信号の検出系、信号処理系および解析系の3系統から構成されており、環境雑音の妨害を極力押えてAE信号のみを計測し、「どのようなエネルギーのAE事象が、何時、何処で、どのような時間的頻度で発生しているか」が調べられるように種々の工夫がなされている。また、このようなAE信号の持つ諸情報を基にして、材料のAE特性および種々の損傷過程のAE特性に関する基礎的な参照データと対比することによって、構造健全性が評価される。

AE特性を定める基本的な計測パラメータとしては、次のものがある。

- (1) 1個のAE信号の波形およびその最大振幅と周波数成分など。これらは1個のAE事象のエネルギーや持続時間に関する性質の情報を示している。
- (2) 複数個のAE変換子への相対的な信号到達時間差とそれらから得られるAE発生源の標定位置。これは損傷域の位置情報を示している。
- (3) 標定位置別のAE信号の発生頻度とエネルギー分布。これらは変形や破壊の動的な進展挙動に関する情報を示している。

以上の計測パラメータにおいて、(1)のAE波形とそれに含まれている各種の情報は、電気的、機械的および流体的な環境雑音からのAE信号の弁別に主として利用されるものである。すなわち、AE信号は、諸環境雑音に対して波形形状および周波数成分的にかなり異質の性状を示すので、これらのことを利用することによりAE変換子で検出される各種信号の中から比較的容易にAE信号を選別することができる。

従来のAE機器では、主として帯域型の周波数弁別器を使用して、信号対雑音比が最も高くなるような周波数領域を選ぶようになっている。このような周波数領域の「窓」を通して観察されるAE信号は、その周波数領域が100kHz付近の比較的低い場合には、S波または表面波モードの伝播波形が強調されると共に、妨害雑音としては、連続型波形の流体雑音や立上りが遅く持続時間の長い突発型波形の機械的雑音（衝撃音など）が主として観測される。一方、周波数域が500kHz付近以上の比較的高い場合には、AE信号としてはP波モードの伝播波形が観察されやすくなるが、電気的雑音や高周波成分を持つ機械的雑音（すべり摩擦音など）の妨害を受けやすい。したがって、適用する対象構造物における環境雑音をまず十分に把握した後、最適の周波数領域の「窓」を設定し、さらに、その際の妨害雑音を波形的に弁別する信号処理が必要となる。現在のところ、このような波形弁別処理としては、信号の立上り時間、持続時間、包絡線検波信号波形の面積、先頭値／リングダウン計数値の関係、などを利用する方法が使用または検討されている。

以上のようにして環境雑音から分離して取出されたAE信号は、(2)の信号到達時間差パラメータの解析により空間的な位置の弁別を受ける。圧力容器の水圧試験の場合のように、超音波探傷法などの他の非破壊試験法が併用できる場合には、このAE位置標定法によりAE信号が集中的に発生している個所がわかれば、その情報だけからでも探傷検査として有効である。一方、溶接部や応力集中部などのようなAE監視対象域が当初より定まっている場合には、(2)の時間差パラメータは空間フィルタとしての利用ができ、(1)の波形パラメータによるAE信号の選別作用と併わせて、監視

域からの必要なA E信号のみをさらに有効に取出せることになる。

2個のA E変換子で観察されるA E信号の到達時間差を正確に定める方法は、上記のようなA E源の位置標定や空間フィルタとしての利用にとって基本となるものであるが、発生源からA E変換子までの距離による信号の減衰や速度分散、さらにはA E原波形の多様性などのため到達時間差の高精度の決定は必ずしも容易ではない。また、A E信号の発生頻度が高い場合には、相関のある1対の信号を選別することが容易でない場合もある。複数個のA E変換子を用いた平面的な位置標定法としては、表2.4.1に示すように、いくつかの方式が開発されてきているが、それぞれ一長一短があり、現在のところ決定的な方式として認められているものはないのが現状である(FAE-15, FAE-27, FAE-36, FAE-41, FAE-48, FAE-53)。現在、高精度かつ高確度で信頼性のより高いA E位置標定法を得るために、A E波形の相互相関、過剰変換子による時間差情報の総合論理判定、高速かつ大容量LSIの利用、などの技術開発が進められている。

さて、波形と位置標定による弁別作用を受けたA E信号の発生頻度とエネルギーに関する(3)のパラメータは、構造健全性にとって最も重要な情報を与えることになる。とくにオンライン連続監視の場合のように、A E法以外に適当な代替監視法がない場合には、これらのA E信号の発生頻度およびエネルギーに関するパラメータ解析から得られる情報のみを基にして、どのような構造上の損傷が進展しつつあるか、という構造健全性を評価することになる。

A E発生頻度として一般のA E計測で多用されている測定量は、単位時間あたりのA E信号の頻度としての「事象計数率」およびそれを累積的に計数した「事象総数」である。また、A Eエネルギー情報に関する測定量としては、A E変換子で観測された1個のA E信号の最大振幅、リングダウン計数、実効値電圧などである。なお、より厳密な意味でのエネルギー測定量としては、上記の量をA E標定位置における量に換算されたものが使用される必要がある。

構造健全性の評価に対して、また損傷モードの推定に対しては、上記のA E発生頻度と単一信号のエネルギー測定量とを結合させた統計的なA E活動度の利用が有効である。そのような統計的なA E活動度の表示方法として、ある任意の期間に発生したA E事象がどのようなエネルギー分布をしているか、ということを表わすA E振幅分布がある。これはある時間内に発生したA E信号の最大振幅 V と V から $V+dV$ までの間の最大振幅を持つA E事象数 $n(V)$ との関係を示すものであり、放射線計測で多用されているマルチチャンネル波高分析器を利用することによって比較的容易に測定される(FAE-2)。

このようなA E振幅分布の計測から得られる情報としては、そのスペクトル形状のほか、次式で示されるようなその計測時間内のA E事象総数 N 、平均最大振幅 \bar{V} 、平均事象エネルギー \bar{E} および全エネルギー $E = N \cdot \bar{E}$ が得られる。

$$N = \sum_a^{\max} n(V) \quad (1)$$

$$\bar{V} = \frac{1}{N} \sum_a^{\max} n(V) \cdot V \quad (2)$$

$$\bar{E} = \frac{1}{N} \sum_a^{\max} n(V) \cdot V^2 \quad (3)$$

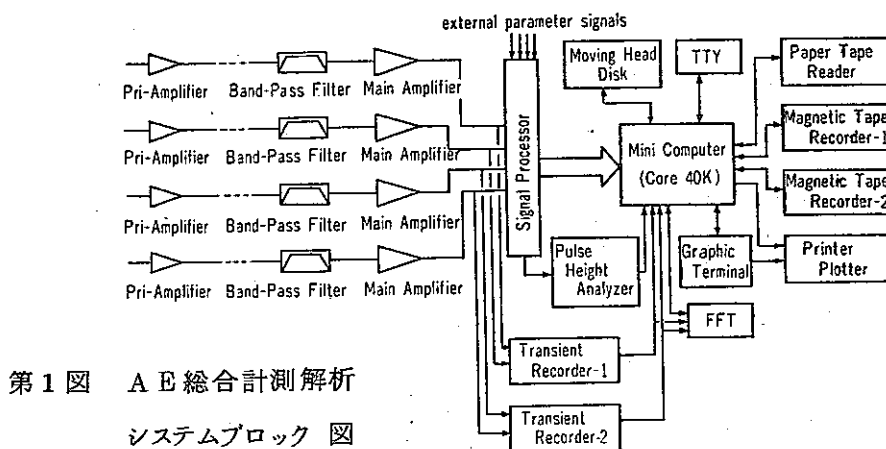
ここで、 a はA Eしきい値である。また、A E振幅分布のスペクトル形状としては、比較的広範囲の振幅域で、

$$\log n(V) = -m \cdot \log V + \text{const.} \quad (4)$$

の関係があり、 V と $n(V)$ を両対数表示すると、負勾配 $-m$ の直線分布となる。この勾配値 m は式(4)が成立する限り計測条件に依存しない無次元の絶対量であると共に、材料の変質や劣化に対して敏感な量である。また、材料の損傷モードに変化がなければ、ひずみ速度に影響されない。

以上のようなA E振幅分布のスペクトル形状(とくに $-m$)および N 、 \bar{V} 、 \bar{E} 、 E のようなパラメータを利用して構造健全性の評価を行なう際の実用的な利点としては、耐圧試験時における圧力の負荷の除荷時、運転中の炉の起動・停止、地震などのようにA E信号の発生が予想される際に、スペクトル形状から材料の損傷モードの判定が期待できること、および N 、 \bar{V} 、 \bar{E} 、 E のパラメータから材料損傷状態の定量的な評価が期待できることにある。とくに、地震時のように複雑な波形の負荷がある際には、A E振幅分布のスペクトル形状がひずみ速度に影響されずに、A E事象発生数(N)の増減によっては縦軸方向の平行移動が生じるに過ぎないこと、また、 \bar{V} と \bar{E} とはそのような縦軸方向の平行移動によっては変化しないこと、などの性質は利用価値が大きいものと考えられる。

耐圧試験の監視などに使用されているA E計測システムと比較して、オンライン連続監視システムは、長期間にわたりデータを採取し、それを集積しなければならず、計測系の安定性と信頼性を常に確認することが必要である。また、定常的な運転状態では、A E事象計数率がひずみ速度に比例する性質やカイザー効果のために、A Eの発生頻度は著しく低いことが予想される。したがって、A E計測システムとしては、そのようなA E的に静かな定常運転時と地震や急速なシャットダウンが生じる場合のように動的な事態のいずれの場合にも対処できるように、必要なA E情報を時間的に濃縮して蓄積および解析できる機能を持つことが必要となる。以上のような理想的なA E計測システムに最も近い位置にあるものの1例として、図2.4.1に動・燃事業団で開発したA E総合計測解析システムの系統図を示す。



第1図 A E総合計測解析システムブロック図

表1. 主な位置標定方式の種類

名 称	方 法	特 徴
時間差直示方式	時間差データを直接表示する方式	位置対応に誤差があるが、 簡便法である。また生データを直接把握できる。
(1) 直接表示方式	各事象ごとに表示する。	
(2) 平均化処理方式	時間差データを蓄積し、平均化する。	
標定点演算方式	時間差一定の双曲線交点として表示する方式	標定点が高精度で得られるが、処理時間が長い。
(1) アナログ演算方式	ハードウェアで標定位置を求める。	
(2) デジタル演算方式	ソフトウェアで標定位置を求める。	
領域標定方式	対象領域を多数の小領域に細分して識別表示する方式	処理時間が短かく、とくに(2)の方式は信号の教え落しがない。
(1) テーブルルックアップ方式	到達順序と時間差の組合せ表からゾーンを定める。	
(2) 信号群コインシデンス方式	シフトレジスタ回路を用い、時間差の組合せをとる。	
(3) 標定点集積方式	小領域内の標定点を集積する。	

3.5 原子力における適用例

原子力分野においてA E法の利用をはかることが考慮されている方向としては次のようなものが挙げられる。

- (1) 構造材料の製造工程における品質管理。
- (2) 溶接過程の監視と溶接後の遅れ割れの監視。
- (3) 溶接後の応力除去焼鈍のための熱処理工程の監視。
- (4) 運転前検査(PSI)における耐圧試験の異常監視と探傷検査。
- (5) 供用期間中検査(ISI)における耐圧試験の監視と概観検査。
- (6) 特定個所の構造健全性に対する運転中オンライン連続監視(OLM)。
- (7) 原子炉系全系統に対するリーク検出やルーズパーツ監視を包含した運転中異常監視および診断。
- (8) 中性子照射ぜい化を対象としたサーベイランス試験における材質診断。
- (9) 材料損傷事故時や部材交換時における材質診断と最大応力履歴の推定。

原子力機器・構造物の建設過程におけるA E法の適用例としては、上記第(2)項の溶接への利用がある。溶接後の遅れ割れに対するA E法の適用はすでに多くの経験が積み重ねられているが、最近では米国NRCプロジェクトとして、原子炉配管の溶接性能をA E法によりインプロセス状況で監視する研究が進められている(FAE-50)。ステンレス鋼管および炭素鋼管に対する種々の溶接法について、A E法の配管溶接中監視の適用性が実証され、すでに現場用として不良溶接時には警報が出るようなA E溶接モニタが試作され実用に供されている。

一方、原子炉圧力容器などに対するPSI時の水圧試験または工場検査(ST)時の水圧試験におけるA E監視の利用は、これまでに多数の実績が積み重ねられている。第2.5.1表は、米国における商業用大型発電炉に対する各種A E法の利用状況の一端をまとめたものであるが、同表に見られるように、Exxon Nuclear社、Dunegan/Endevco社、AET社、Westinghouse社、などによりDresden、Peach Bottom、La Salle(以上BWR)、Prairie Island、Zion、Calvert Cliffs(以上PWR)など多数の商業炉について水圧試験時のA E監視が実施されている。また、Exxon Nuclear社では、1975年までに約60回の原子炉圧力容器のA E検査実績を有しており、その中約50回が欧州において実施されている。オーストリアやスイスのように、このようなA E監視試験の良好な適用実績から、A E試験を経験していない容器に対しては設置許可を与えない、とするA E試験の義務づけをはかろうとしている国もある。

ISI時における水圧試験にもA E法は適用実績を重ねつつある(FAE-3、FAE-27)。

ISIの場合には、PSIの場合に比較して初期の構造健全性の低下と放射線被曝による接近性の問題が加わることになり、次のようなA E法の長所が強調されてくる。

- (1) 超音波探傷法など従来の非破壊検査法が適用しにくい個所に対して、それらの代替法として探傷サーベイができる。
- (2) 超音波探傷のように検出部ヘッドの表面走査をする必要がなく、固定した複数個のA E変換子で全系統の体積検査ができ、時間、費用、マンパワーの大幅な節減が期待できる。

(3) 危険な進行性の構造欠陥が存在していると、低い圧力からA Eの発生が始まり、欠陥の成長とともにA E発生率が高まる。このような構造欠陥の動的挙動に対するA E法の監視機能を利用し、耐圧試験自体の安全性が監視できる。

(4) 局部的な異常変形や構造不安定性、リークなどに対するA E法の鋭敏な探知機能を利用して、高度の構造健全性が確認できる。とくに、耐圧試験時は運転中に比較して静かな計測環境にあるので、リーク検出に有効である。

表1における米国の適用例ではI S Iに対するものは限られているが、Exxon Nuclear社の欧州における実施例中にはI S I時の水圧試験への適用実績が含まれており、探傷リーク検出および水圧試験自体の安全性監視に対して有効であった例も見られる(FAE-3, FAE-27)。

A E法のリーク検出に対する有効性を示す実用例として特記すべきものは、カナダの重水炉における390本もの多数の圧力管から、リーク不良管を迅速で正確に検知できた成功例が挙げられる。(FAE-3, FAE-33, FAE-34)。

A E法の原子炉運転中のオンライン連続監視への適用は、A E法の広範な応用分野において最も難しい応用面の一つであり、厳しい環境条件下での高度の計測技術と総合的なデータ評価とが要求されることになる。またA E法以外に連続監視に適用できるような適当な代替法がないことも、耐圧試験への適用の場合と著しく異なった特徴である。

現在、主として実施されている運転中連続監視へのA E法の適用状況は、配管系溶接部などのような特定のクリチカルな個所のみを集中的に常時監視しようとするものである。これは、圧力パウングリ全システムのオンライン連続監視に比較して、A E信号の伝播減衰による計測条件も緩和されることになると共に、A E計測系も比較的簡素化できる、などの利点があり、全システムの連続監視への最終目標に至る予備的な試用として、表1の例に示すように、米国ではDresden, Quad Cities, Vermont Yankee (以上BWR), Peach Bottom (PWR)などにおいて試験的に実施されている(FAE-3, FAE-41)。また、ヤールズパーツ監視的な実用例ではあるが、西独KWO (PWR)炉の蒸気発生器の放射能リークを音響ノイズレベルの上昇から事前に検知していた例が報告されている(FAE-3)。

最後に、実動の高速増殖炉への適用例については、炉心における液体ナトリウムの沸騰音の検出、蒸気発生器におけるリーク検出、などにA E標定技法を利用した実施例がいくつか報告されている(FAE-48)。また、米国EBR-II炉では、音響診断法により1次ナトリウムポンプの低圧側ラピンスシールの欠陥および中間熱交換器内の配管サポートの破損を検知し得た例も報告されている(FAE-18)。しかし、これらの適用例のほとんどは、音響周波数域として数+kHz以下の低周波音響を利用するものであり、音響診断Acoustic Signature Analysis的な実用例である。上述の軽水炉の例のような配管系のき裂や割れの存在および進展度を監視しようとするA E法本来の実用例については、現在のところ、ほぼ皆無といった状況にある。

表1. 米国における商業用大型発電炉に対するA E利用状況

原子炉名	炉型出力MWe	始動	所有者	A E 計測	実施者
San Onofre-1	PWR 430	67	Southern Cal. Edison	N	BN _w L
Millstone Pt-1	BWR 652	70	Connecticut Light & Power	N	S _w RI
Dresden-1	BWR 200	59	CEC	PSI, OLM	Exxon Nucl, CEC (Dunegan/E)
Dresden-2	BWR 809	70	CEC	PSI, OLM	CEC/NRC
Dresden-3	BWR 809	71	CEC	OLM	CEC, Dunegan/E/NRC
Quad Cities-1	BWR 809	71	CEC	Dresden とほぼ同様	
Quad Cities-2	BWR 809	73	CEC		
La Salle-1	BWR 1,078 (77)		CEC	ST	Chicago B & I (EPRI/GE/AET)
Zion-1	PWR 1,050	73	CEC	PSI	Exxon Nucl.
Zion-2	PWR 1,050	73	CEC		
Vermont Yankee	BWR 514	72	Vermont Y. Nuclear Power	OLM	Trodyne Chicago B & I (Exxon Nucl)
Peach Bottom-2	BWR 1,065	73	PECO	ST	Exxon Nucl. PECO
Peach Bottom-3	BWR 1,065	74	PECO	PSI, OLM	(Trodyne)
Prairie Island-1	PWR 530	73	Northern States Power	PSI	Westinghouse
Prairie Island-2	PWR 530	74	Northern States Power	ISI	Westinghouse
Calvert Cliffs-1	PWR 845	74	Baltimore Gas & Elect.	PSI	Exxon Nucl.
Calvert Cliffs-2	PWR 845 (76)		Baltimore Gas & Elect.	PSI	Dunegan/End. (ERDA/NRC)
St. Lucie-1	PWR 801	75	Florida Power & Light	PSI A E検出器劣化試験	Exxon Nucl.

N: 雑音測定, ST: 工場検査, PSI: 供用前検査, ISI: 供用中検査, OLM: 稼働中監視

4 章 文献調査に関する総括

FBRの供用中AE監視に関して、2章に本委員会で調査した文献の抄訳を、3章に各項目別にそれらのまとめを記述してきた。現在のところ、AE法の連続監視への適用範囲は、熱衝撃を含めた熱応力の繰り返し、さらにクリープの影響も含めた低サイクル疲労による亀裂進展の検出等の範囲と云うことができる。FBR運転中の背景雑音は、0.1～1MHzの周波数帯域では、その低周波域で若干大きいのが、軽水炉に比較してかなり有利な条件にあり、実用上、それ程問題にならないと云える。又、変換子に関しては、照射効果もあまり問題にならず、絶対感度の較正法が確立されねばならないが、当面、相対的な標準規格化さえ実機適用温度範囲で行われれば問題なく、現在導波棒使用法により、既に、実用可能な状態にあると云える。加えるに、高温センサーの開発も進んでおり、導波棒使用と併行しての使用が期待される。信号処理技術は、当然、材料特性（欠陥の進行特性）を考慮して処理因子を決定しなくてはならないものであり、位置評定により得られた各信号を個々に信号処理をほどこすことにより、数量のみでなく、振巾分布、周波数分布等を有機的に得る手法を確立し、信号処理から欠陥の評価を行う方向が見い出されねばならない。現在の所、この段階による信号解析が充分に行われているとは云いがたいが、計測技術そのものは、このような信号処理を行い得る段階に到達していると云える。材料特性に関しては、実機に近い状況での低サイクル疲労におけるAE挙動は計測され、その温度依存性、AE生成位相、亀裂進展とAEの関係が定性的に理解されるにいたっている。しかしながら、塑性変形に伴うAE、亀裂進展に伴うAE、Crack Closureに伴うAEなどを明確に分離すること、又、より積極的に、信号処理の結果より、欠陥を定量的に理解する段階にはいたっていない。この点が、AEを実機の構造物監視に適用するにあたって考慮しなければならない点であり、現在の所、AE適用における最大の問題点であると云える。

以上、総合的に見ると、現時点では、AE法は連続監視における欠陥探知法としてAE法のみにより亀裂の進展及びその危険度を判断するに耐えうる手法としては、今一つの段階にあると云える。しかし、過去数年における変換子、測定技術、信号処理法の進歩はこれらの点での実機適用の不安をほぼ解消しており、これから数年間に材料評価に関する基礎資料の蓄積が得られ、個々の欠陥評価に適した信号処理技術が確立するならば、近い将来に充分実機適用の可能性を有しているものと結論できる。

5 章 A E法による材料評価に関する一提言

5.1 現状把握

A E法による運転中監視に関して、その有効性に関しては種々の意見がある。まだ強制的にA E法を使用する段階にないが、最近、数年間における、A E装置、A E信号処理法の大幅な進歩を考えると、将来に期待しうる所が大きいと思われるが、未だ経験不足からくる不安感をぬぐいきれない。このA E適用法の研究は、米国では規格化を進めるなかでその有効性を見い出そうとしている。この規格化の問題点は二つあり、ASMEによると、A案は変換子の較正、B案はA E源の等級わけとなっている。A案は、少なくとも相対的な規格を作るには、現在、技術的には問題なく、実行意志の問題であり、大多数の人の満足のいく形で早急に解決が望まれている。この点に関し、我国では、既に、溶接協会のFAE委員会、およびHP IのA E委員会を中心にした共同作業で、感度較正の原案がまとまり、本年より、既に作業が開始しており、この点の問題はほぼ解決され得る現状にある。しかしながら、高温時における較正も必要であり、その装置作りも急がねばならない。

B案のA E源の危険度の等級分けは、つまり所A Eの材料特性を十分に理解し、それに適合した形での信号処理法を確立し、A Eによる材料評価を定量化することである。

一方、ヨーロッパでは、信号処理法を中心に、A Eの有効性を検討する傾向で研究が進んでいる。これは、つまるところ上記B案と相通じるものと理解される。又、最近Stahlkopf等により、A E法に批判的な論文が提出されているが、例えば、彼の問題とする6項目の内1つは、変換子の標準化であり、残る5項目は全てA Eの材料特性に関することであり、A E発生機構から、A Eによる亀裂進展の定量化、その危険度の評価等にわたる項目である。以上要するに、現在諸外国におけるA E法のneckは、研究室的なA E材料特性の定量化と、実機におけるA Eによる材料評価(欠陥の危険度の定量化)の一点にしぼられてきたものと思われる。

このような諸外国の現状の中で我が国においては、上記二委員会を中心に、既にA Eの材料特性を定量化する試験研究が52年度よりはじまっており、この動きは、諸外国に一步先んじたものと云える。平滑材試験片(板材、および丸棒材)、C-T破壊靱性試験片、低サイクル疲労用試験片の標準試験片が決められ、先に述べた同一の標準変換子較正法で得られた変換子を用いて試験研究を進めることになっている。当面、SUS304、SUS316、 $2\frac{1}{4}$ Cr-1Mo鋼、A ℓ 合金、HT-60、軟鋼の各材料を用いて、実験を進める計画が出発している。

このような試験研究を進め、且つそこで得られた資料を、実機によって得られたA E信号といかに結びつけるか、即ちどのような材料因子と、どのようなA E信号処理結果を関係させるべきかが、この研究を進める上に生ずる問題と云える。

以上、A E法の実機適用の適否を判定するのは高温を含めた温度域で変換子の標準化を行ない、A E材料特性を確立し、それに適合した信号処理法を規格化すること、そしてそのためには材料特性を表示するパラメータと、必要な信号処理項目を選びだすことであるとまとめることができる。

以下において、FBRを対象にしつつこの問題に関する提案と、若干の考察を進めようとするものである。

5.2 FBRにおける対象モデル

考察を容易にするために、具体的に一次冷却系のエルボ要素を取り上げ、そこにおける疲労亀裂の存在をFBRシステムの機能を損なわぬ内に見出せるか否かといった面からの検討を進めることにする。

当該コンポネントの形状、製造履歴および想定される運転履歴を考慮すれば、簡略な構造解析的検討により、破壊がおこり得る個所をある程度限定することが可能となる。

上記例について、運転履歴上、温度変化に伴う熱膨張または地震荷重等による面内、面外繰返し荷重、圧力バウンダリ境界上の温度変動に伴う熱衝撃荷重を主要な印加荷重とする。

前者の面内、面外繰返し荷重に際し、最大応力が生ずる個所は、エルボ横腹を中心としたある程度の広がりをもつ領域である。また、熱衝撃応力は、ここで取り上げたような単純な形状に対しては、比較的均一な応力を与える。一方、当該コンポネントの材質的信頼性の上からは、溶接部が最も劣る。従って、上記例に関して運転中監視が必要なのは、面内、面外曲げモーメントに対し応力が最大となるエルボ横腹部付近および溶接線ということができる。

上記対象部のみを計測する空間フィルターの構成は、構造物上での音響伝播特性が明らかとなれば、既存の技術で十分可能である。

5.3 欠陥表示パラメーター

—— 亀裂面積 S の導入 ——

表面から入っている亀裂は、三次元的亀裂の代表であるが、図5.1のように、半楕円形で近似できる場合が多い。もっとも危険な不安定破壊ではモードIが重要になり、その時の応力拡大係数は、次の形で与えられる。

$$K_I = \frac{\sigma \sqrt{\pi a}}{E(k)} (1 - k^2 \cos^2 \varphi)^{\frac{1}{4}}$$

ここで、 $k^2 = 1 - (a/c)^2$ 、 $E(k)$ は、

$$E(k) = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sqrt{1 - k^2 \sin^2 \xi} \cdot d\xi$$

で与えられる。その最大値は、 a 方向の単軸端にあり、

$$K_{I \max} = \frac{\sigma \sqrt{\pi a}}{E(k)}$$

で与えられる。 $k \rightarrow 1$ は、二次元板厚貫通亀裂に相当するが、 $k \rightarrow 0$ の円板状亀裂との差は、 K_I 値で高々3%である。図5.2には、一般の a/c における亀裂形状の補正係数 Q の値が示してあるが、この値を用いることにより、下の式に示した二次元の取り扱いが可能となる。

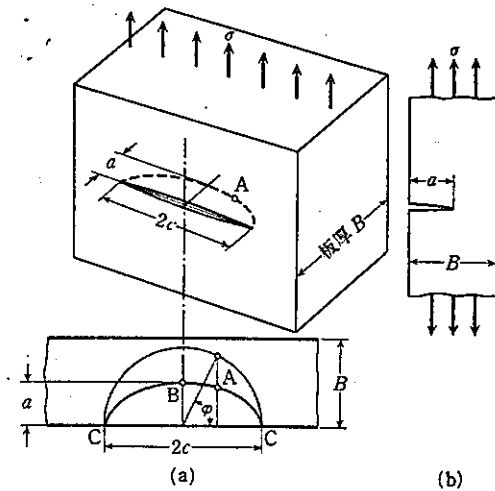
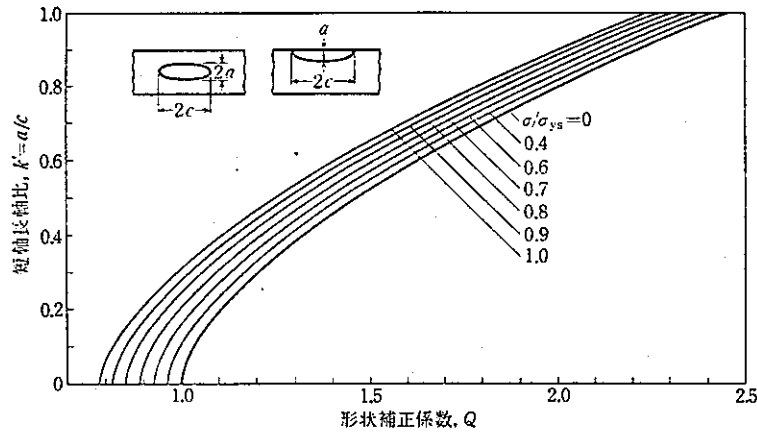


図 5-1 半楕円形表面クラック



$$Q = [E(k)]^2 - 0.212(\sigma/\sigma_{ys})^2, \quad K_{I,max} = \sigma \sqrt{\pi(a/Q)}$$

図 5-2 楕円板状クラックの形状補正係数

$$K_{I,max} = \sigma \sqrt{\pi(a/Q)}$$

以上、表面き裂を、二次元亀裂で取り扱い、且つ、亀裂形状を半円形でおきかえることは、実際の亀裂を取り扱うにあたり、応力拡大係数から見るかぎり大きな誤差にはなりえないものと考えられる。

不安定破壊が生ずる限界亀裂長さ a_c が、 $a_c < B$ (板厚)にあるときは、当然のことながら、亀裂として検出しなければならない限界寸法 a は、 $a < a_c < B$ となる。

このように成長する亀裂寸法、そして複雑な亀裂形状と云う制約のもとに、簡略化のために欠陥を表示する因子として、亀裂表面積 S と云う量を導入して、この値で一元的に亀裂を評価することを試みてみる。この場合、上述のように、半円のき裂を考えると充分なので、

$$S = \frac{1}{2} \pi a^2$$

そして、限界亀裂面積を S_c^* とすると、 $S_c = \frac{1}{2}\pi B^2$ として、不安定破壊が生じないためには、

$$S < S_c^* < S_c$$

なる条件で、亀裂が検出されなければならないことになる。

この S について若干検討してみる。二次元モデルにおきかえると、亀裂進展速度は、

$$\frac{da}{dn} \propto (\Delta K)^m$$

で与えられる。それ故、

$$S = \int ds = \int a (\Delta K)^m dn$$

で表わされ、亀裂面積 S は、応力拡大係数 ΔK と、亀裂寸法 a なる二つのパラメータを一元化した値と理解することができ、且つ亀裂進展に伴う累積した亀裂挙動を表わし得るパラメータとしての意味を有する。

5.4 AE発生源とその分離

図 5.3 のモデルに示したように、下記の如く亀裂近傍より種々の AE が生ずるものと考えられる。

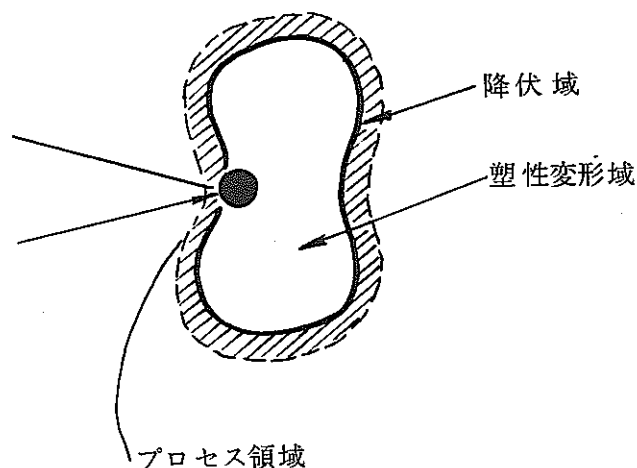


図 5-3 干裂進展に伴う AE 発生域

	重要度
(1) 亀裂近傍と塑性変形	
(1.1) 新しい降伏域	A
(1.2) 塑性変形域	C
(1.3) Bauschinger 効果	B
(2) 亀裂進展	
(2.1) 粒内割れ	A
(2.2) 粒界割れ	B
(2.3) Void の形成, 合体, 消滅	C

(3) 亀裂表面の摩擦

A

(4) 酸化被膜の破壊

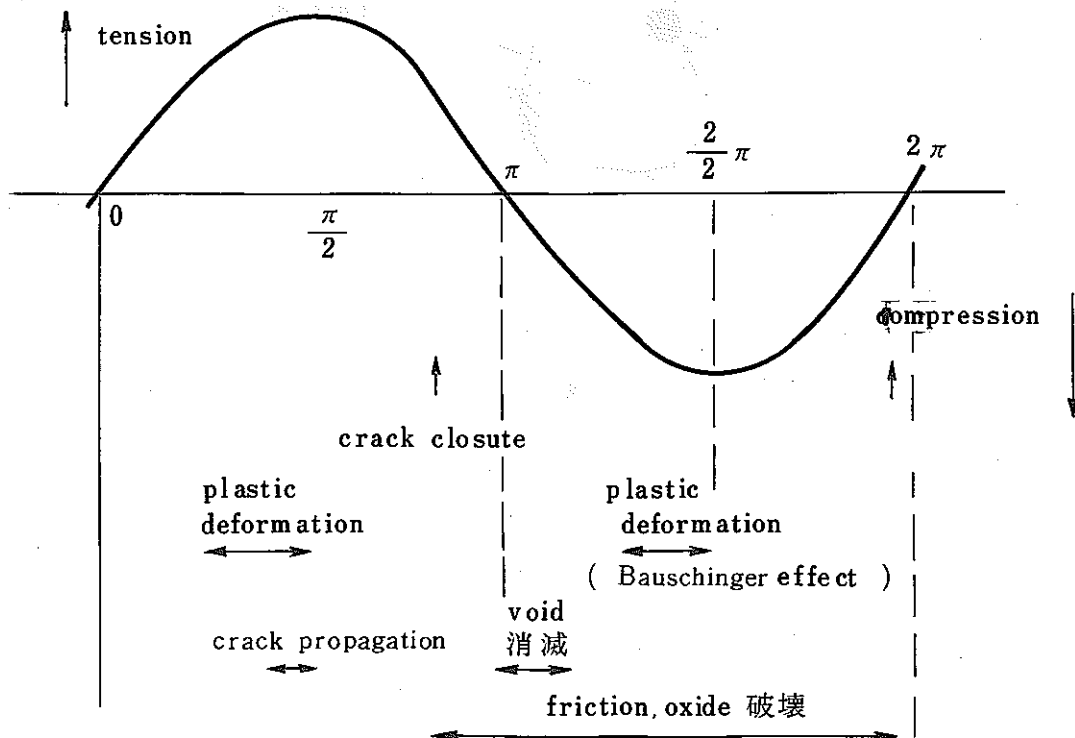
B

上記の A E 源が、実機の低サイクル疲労による亀裂進展に伴ない活動する事が考えられるが、対象とする材料を SUS 304 に限って考えると、平滑材の単軸引張りに伴う結果より (1.2) の寄与は小さいと考えられる。又、低サイクル疲労の破面観察等の結果より、(2.2)、(2.3) の寄与も少ないと思われる。高温に試片を保持しても、A E の信号には殆ど寄与がなく、(4) の効果もそれ程大きいとは考えられない。

このように検討してみると、その重要度の度合を記号、A、B、C で分類して示してあるが、上に示したように、(1.1)、(2.1)、(3) による A E 活動度が支配的であり、この他に (1.2)(4) の寄与を考慮すべきものと思われる。

ここで、これらの材料因子により生ずる A E を分離する手法について検討してみる。図 5.4 に、これらの生ずる応力状態を、応力一定の低サイクル疲労試験に関して記したものである。この場合、 $R = 0$ なので $\Delta K_{eff} = \frac{1}{2} \Delta k$ それ故、図 5.4 に示す位置での crack closure に伴って (3.0) の friction に伴う A E の発生が考えられる。又、新しい降伏は最大引張り応力の近傍に、亀裂進展も又、同じような位置に生ずる。B E に伴う A E は、SUS 304 では顕著であり応力方向が逆転する位置で期待される。

図 5-4 応力位相と音響要因



以上、A E源の因子を区別するのは、各位相に伴なうA E挙動を正確に把握することが第一であるが、(1.1)と(2.1)の区別は、これでは難かしい。このためには、一つは塑性変形のA Eは歪速度に対して、 $U \propto \dot{\epsilon}^{1/2}$ なる関係をもつことを利用して繰り返し速度を連続的に変化させて、その時のA Eを測定すること、又、平面歪条件では、クラックの進展面積 ΔS が $\Delta S \propto 1/G$ の関係より、クラック進展速度をGおよびKなどに対して整理すること等により、A E源をつきとめうる可能性がある。又、この他に塑性変形と亀裂進展のA Eを分離する手法として微視的に不安定破壊が進展している場合には、振巾分布の測定も意味を有することは特に重要である。

(付) 現在保られている上記各機構におけるA E挙動をまとめて参考にしたい。このような取り扱いからみて、面積Sの意味も論じられるべきものだろう。

A E発生源

1. 塑性域拡大に伴なうA E

1.1 Malen

$$\sigma(r) = C_0 \cdot \frac{b \cdot \rho_m \cdot \Delta V}{r}$$

r : パルス源からの距離

ρ_m : 可動転位密度

ΔV : 変形体積

b : バーガースベクトル

$\sigma(r)$: A E波振巾

1.2 Dunegan

$$\dot{N} \propto \dot{V} = N \propto K^4$$

\dot{N} : 計数率

N : 計測総数

1.3 Parmer

$$\dot{N} \propto \dot{\gamma}_P = N \propto \delta$$

$\dot{\gamma}_P$: 塑性域の大きさ

δ : 亀裂開口変位

1.4 実験結果の例

(a) $N = A \cdot K^m \quad 2 < m < 20$

(b) $N = B \cdot \delta^n \quad 1 < n < 15$

(c) $E_T = \sum_i k_i V_P^2 = C \cdot \dot{\gamma}_P^\ell \quad \frac{1}{2} < \ell < 4$

V_P : 最大振巾電圧

(d) $RMS \propto \exp\left(-\frac{0.4 \text{ eV}}{kT}\right)$

2. 亀裂進展に伴う A E

実験的には塑性域拡大を伴うので(1)と(2)の本当の分離は難しい、それ故、平滑材の引張りに伴う A E が少ない材料に対して、平面歪条件のものに対象をしぼる。

2.1 Gerberich

$$g \propto K \cdot \Delta S$$

g : A E 波の振巾

ΔS : 亀裂面積の増分

2.2 Kishi

$$\begin{aligned} E_T &\propto G^5 \\ N &\propto G^5 \end{aligned} \rightarrow \Delta S \propto \frac{1}{G} \propto \frac{1}{K^2}$$

G : エネルギー解放率

3. 亀裂面の摩擦に伴う A E

$$N \propto S \quad \text{or} \quad E_T \propto S$$

4. Bauschinger 効果に伴う A E

$$N = N(SFE, DS)$$

SFE : 積層欠陥エネルギー

DS : 介在物, 分散物の間隔

以上の如く理論的, 実験的に得られた, A E 源の特性は, 破壊力学因子, 塑性因子により独立に整理され, 又各々の整理には, 互いに矛盾する要素も含まれている。しかしながら, 実験室的研究を今一つ系統的に進めることにより, 使用可能な関係式を得ることは可能であり, 且つ全体に, 亀裂面積 S が関与する形で整理しうる可能性を含んでいるのは興味深い。

5.5 A E アクティビティと A E パラメーター

A E 測定におけるパラメーターとして次のものが考えられる。

- (1) 計数(率)
- (2) RMS 電圧
- (3) 振巾分布
- (4) 周波数分布

A E activity としては, 図 5.5 に示したようにあるしきい値レベル V_{th} より大きな事象の数又は, その事象数の最大電圧 V_P , および V_P をもつ事象数 N_E の値から求めた A E エネルギー $E_T \propto \sum N_i \cdot V_P^2$ の大小により評価することができる。このような A E activity により, 位置評定と, おおよそその欠陥の進展の状況をつかみうることは, 可能である。

しかしながら, 単に位置評定のみでなく, 信号と雑音との分離をもかねて A E から欠陥を評定するには, 計数のみならず振幅および周波数の分布を知る必要がある。周波数の解析については, 変形が進むと高周波成分が増すことはよく知られているが, 変換子の特性を直接受けつぐために, そ

の相対変化の物理的意味を捕えにくく、又塑性変形、亀裂の区別をも周波数解析から得ることは、かなり難しい。しかしながら周波数解析で信号を区別しえた例もあり、どちらかと言うと高周波域の(400KHz~1MHz)周波数解析には期待がもてる。

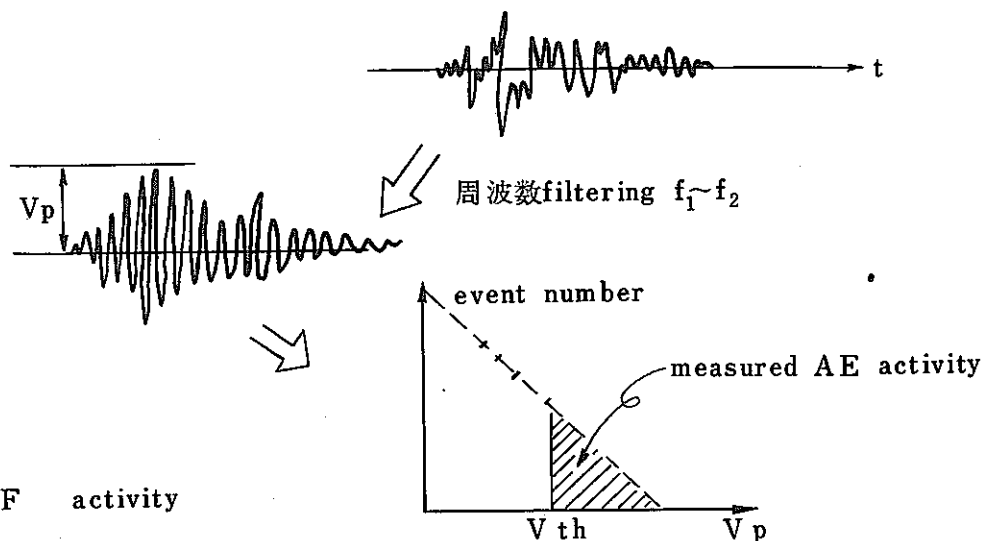


図 5-5 AF activity

一方、振幅分布に関しては、音響の伝達関数を定量的に把握する困難さのゆえに、その絶対値の意味づけには未だ不明の点が多いが、その分布を知ることにより生じた事象の性格をかなり明瞭に理解することができる。

一般に、事象数の振幅分布は、各事象の最大振幅を V_p , V_p と $V_p + dV_p$ の間に最大振幅をもつ事象の数を $n(V)$ とすると、

$$\log n(V) = -m \log V + \text{const}$$

の関係が成立する。この勾配を示す値 m は、亀裂が進展し大きな事象が生じはじめるとその値が小さくなる。それ故、この m 値を測定することによりかなり明瞭に、亀裂の進展を捕える可能性がある。又、図 5.6 に示したように、振幅分布が唯一つの m によって示すことができず、材料および試験条件により、あるしきい値レベルを境にして m 値が増加したり(a)、逆に事象数が増加して、ピークを有したりすることがある(b)。このような場合には、特に情報が得やすく、振幅分布の有効性が、増すものと考えられる。

又、事象数が増し、多くの事象が短時間に重なって生じ、各事象の分離が難しい場合には、リングダウン計数による振幅分布を得て情報を整理することも可能である。一般にリングダウン計数の積分モード振幅分布は、次の形で整理できる。

$$I(V_t) = f_0 \cdot \exp(-a \cdot V_t^m)$$

f_0 は共振周波数、 a , m は定数であり、 m は、 $\frac{1}{2} \leq m \leq 2$ の値を取る。亀裂の進展により振幅分布が変化しこの m の値が変化する事により、亀裂に関する情報がえられるわけである。

以上、AEを表示するパラメーターとしては、単に事象数のみでなく、周波数解析はもとより、その振幅分布に注目することが信号、雑音の分離のみならず欠陥を評価するにあたり、特に有意な手法と考えられる。

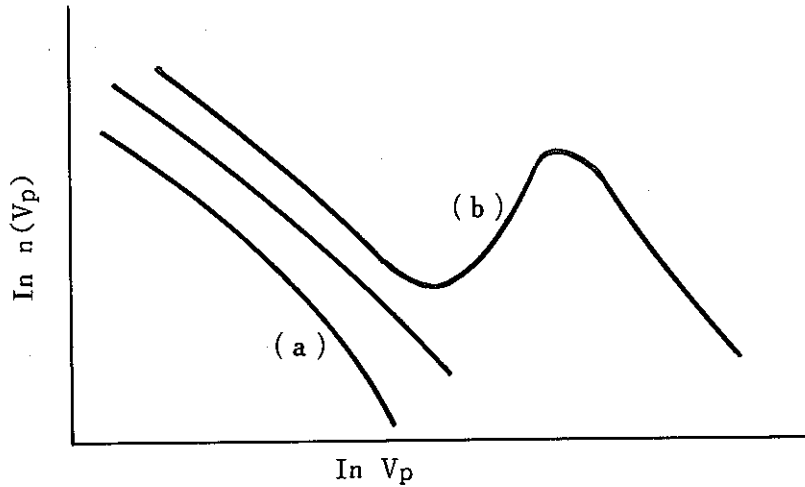


図 5-6 事象数 $n(V_p)$ の振幅分布

5.6 亀裂面積とAE

有効性評価

5.4に示したように、疲労亀裂進展に伴ない発生する音響の要因は、様々な因子が考えられるが、それ等の要因は全て、何らかの形で亀裂面積 S に相関を有していると云える。

勿論、要因により S の関与のしかたは異なり、また他の副次的因子(応力レベル、 a/c 、雰囲気等)により異なりもすると思われるが、他の幅次的因子については実機で想定しうる範囲を限界とすれば、例えば応力は $2\sigma_y$ を越えない、或いはあまりに低応力の域ではcrackの発生・成長を考えなくても良い等ある限界値が定まり、下記のような線図が描けることになろう。(図5.7)

前述のように、AEアクティビティが求まると単位面積当りの背景雑音(BGN)と位置標定間隔 α および先に求めた S_c を用いてAEの有効性、評価を図5.8のようにして求めることができる。

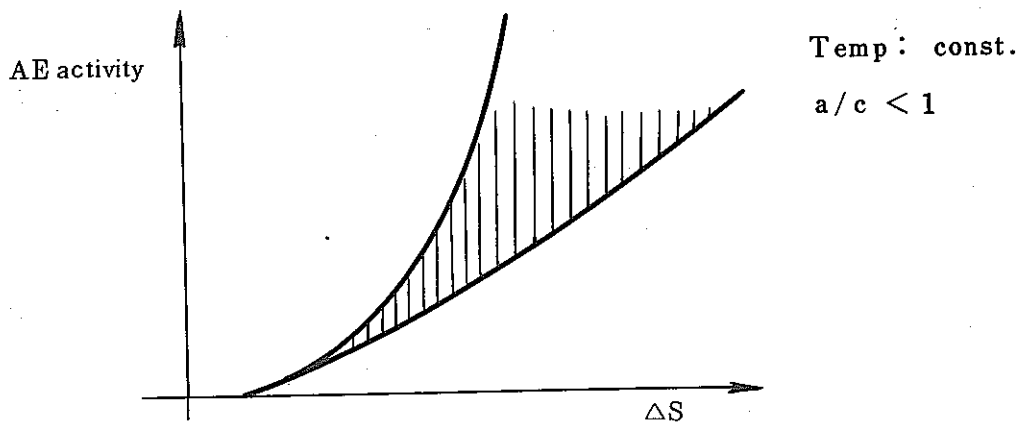
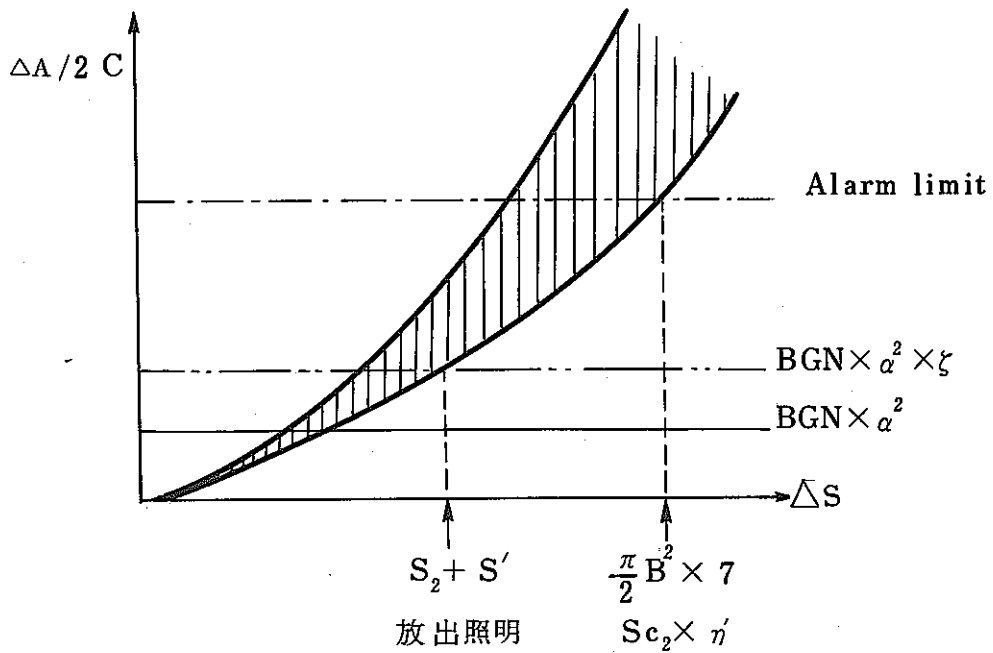
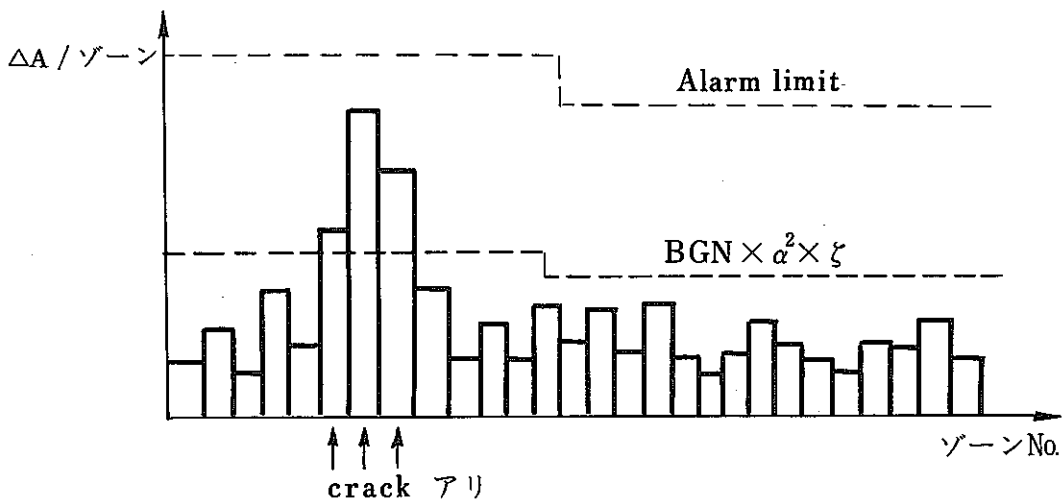
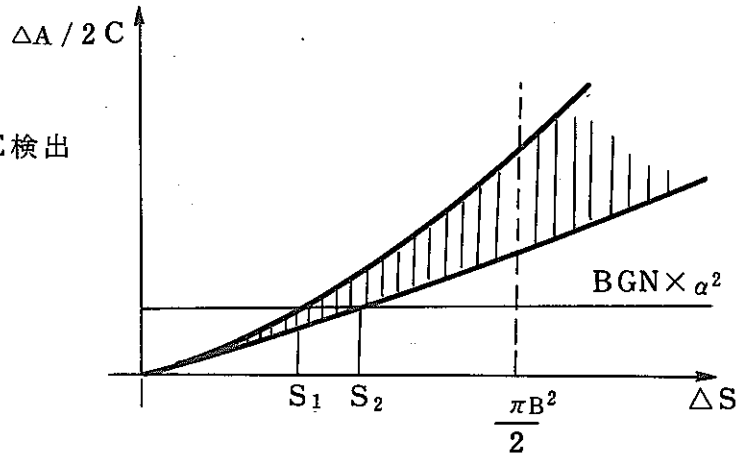


図 5-7 AE activity のき裂面積による変化

図 5-8 AE 検出



η : 貫通に対する safety factor
 η : 不安定破壊に対する safety margin

η : 計測誤差に対する safety margin

図 5-9 AE 検出と Alarm limit :

即ち、 S_1 は検出可能限界値であり、 S_2 は有意検出限界を与えることになる。もしも、 $S_2 \ll S_c$ なら AE 法は十分に有効であると評価できる。たとえ $S_2 > \frac{\pi B^2}{2}$ でも $S_2 < S_c$ なら leak detector との相互補足的役割により機能は果し得ることになる。何故なら $\frac{\pi B^2}{2}$ という極めて面積的に微小なものは AE 法により必ずしも検出されなくとも $2c$ が極めて大きい surface crack が検出できるからである。従って(2)で述べたモデルにたしかえると、必要な領域を α^2 程度の面積に分割して一定期間計測する。各ゾーンに対する AE アクティビティの累積において BGN レベルは、運転条件（温度を含む）の関数として入力することが可能になる。

そして、空間的には計測誤差に対する safety margin を ξ とすると図 5.9 の如き状況において、亀裂が検出される。又、貫通に対する safety factor を η とすると、図の $\frac{\pi B^2}{2} \cdot \eta$ 、又は不安定破壊に対する safety factor を η' に設定すると、 $S_c \cdot \eta'$ が alarm limit に到達した時に運転が停止されねばならない。

この場合、重要なことは検出限界をこえた場合に生ずる信号に対して、Alarm limit に達する前に振幅分布解析、周波数解析により欠陥の危険度を推定し、意味なく運転が中止されるような過剰検査にならないような十分な配慮がなされねばならない。

6 章 A E 研究の今後の進め方への一提言

5章において、A Eによる材料評価に関し若干の見解を述べたが、上述の現状を鑑みて今後4～5年間の時期に、実機適用を目標に、それに向かう研究の進め方に関して一つの提案をしたい。まず、最初にA E研究のかなりの部分が位置評定法にのみ偏りすぎてしまい得られた信号の材料的意味があいまいのままに信号処理が行なわれてきた手法を反省しなければならない。観測された信号、即ち欠陥の性質をある程度理解又は想定した上ではじめて適格な信号処理法の開発が生じてくるべきものである。この材料特性を有すると云う点において、A E法は他の非破壊検査法と明確に区別されねばならないと云える。また諸外国におけるA E適用に関する批判の大多数もこの点に要約されている。それ故に現在、最も急いで確立されねばならない中心課題は、低サイクル疲労の亀裂進展に伴うA E挙動におよぼす材料因子の定量的把握である。このためには、そのback dataとして、平滑剤、亀裂 notch付き材料の繰り返し変形に伴うA E測定豊富な資料が必要となる。これをsystematic に進め、相互のデータを比較検討できる体制を国内で確立することが望まれる。そのためには、

1. 変換子校正の国内標準化

米国の規格化はまだ時間を要するのでF B Rのために、縦波、表面波の校正を行ない、F B R用の変換子の標準化を進める。特に高温時の変換子の標準化にも努力すべきである。

2. 平かつ材及び疲労予亀裂材の引張り変形に伴うA Eの測定。

温度依存性、歪速度依存性、板厚効果、試験片体積の影響を明らかにする。特に波形観察、振巾分布（事象数、リングダウン計数共）、周波数分布を明確にする。

3. 引張り-圧縮及び繰り返し曲げによる低サイクル疲労亀裂進展に伴うA Eの測定。

A Eの生ずる位相を明確にし、塑性変形、亀裂進展、試片表面摩擦によるA Eを分離する。そのために歪速度、温度、板厚、応力比を変化させ、上記三機構分類の手だてとする。又、各々の機構によるA E特性、特に振巾分布特性の相異に注目する。加うるに真空中のA E挙動を計測し、酸化膜の影響をも明らかにしなければならない。

4. 上記(1)～(3)で得られた結果を5章Appendixに提案した亀裂表面積Sの関数として整理する。

5. 実機模型実験で得られた結果を(4)で得られた研究室的材料試験の結果と比較検討し、発生A Eの源を明確にし、それを充分に表示しうる信号処理法を確立する。

実験想定時期

- (1)項 52年度, 53年度, 54年度
- (2)項 52年度, 53年度
- (3) 52年度, 53年度, 54年度, 55年度
- (4) 55年度, 56年度
- (5) 54年度, 55年度, 56年度

7 章 結 言

A E法を、供用中 F B R の一次冷却系配管の安全監視に適用するための予備調査を行なった。現在のところ、F B R 実機適用に関する文献は少なく、直接 A E 法の有効性を評価する段階にはない。

しかしながら、F B R における背景雑音は軽水炉に比較してそれほど問題にならず、又、より一層の改良を必要としながらも、変換子とその取付法および信号処理技術そのものは実機適用可能なレベルに到達していると考えられる。

現実には、実機に近い条件の実験結果によると、少なくとも欠陥がある程度進展した状態においては明らかに充分検出可能な A E 信号が計測されており、I S I、P S I においては勿論の事、他に代替法のない Online Monitoring においては、A E 法は安全監視手段として期待されうるものであり、近い将来に充分実機適用の可能性を有していると考えられる。

今後は、変換子の国内標準化を進めるなかで A E 信号に及ぼす材料因子、力学的条件の影響を明らかにし、実機における欠陥を定量化する評価法の確立が望まれる。そのための欠陥評価法および具体的な研究の進め方についても一つの提言がなされている。

51年10月より、52年6月までの約9ヶ月の短い期間ではあったが、委員会の出席もよく、調査文献の消化も委員各位の協力によりスムーズに進み得たことはよろこばしいことであった。問題点のある程度明確にし、今後の進め方についてもかなりの意見文献が行われたことも一つの成果と考えられる。