AE 法による FRP クライオスタットの監視

西嶋茂宏, 岩崎博昭, 岡田東一, 藤岡耕治*, 倉岡泰郎*

大阪大学 産業科学研究所 大阪府茨木市美穂ヶ丘8-1

* (株)ほくさん 低温技術開発センター 茨城県筑波郡谷田部町二の宮3-16-2

(1985年10月18日受理)

Application of Acoustic Emission Technique as a Monitor System to FRP Cryostat

Sigehiro NISHIJIMA, Hiroaki IWASAKI, Toichi OKADA, Koji FUJIOKA* and Yasuo KURAOKA*

The Institute of Scientific and Industrial Research, Osaka University, 8-1 Mihogaoka, Ibaraki, Osaka

* Cryogenic Technology Development Center, HOXAN Corp.,

16-2 Ninomiya, 3-chome, Yatabe-machi, Tsukuba-gun, Ibaraki

(Received October 18, 1985)

Synopsis:

The acoustic emission (AE) from FRP cryostats has been studied in order to establish the monitoring systems of FRP Cryostat. Kaiser effect was found in FRP cryostat and hence using AE method we can estimate the stress history of any FRP cryostat. Condition of coolant was also detected by AE techniques. Sudden decrease of internal pressure which leads to the rapid evaporation of coolant can be detected as sudden increase of AE counts. It is also found that the vacuum leak area caused by gaseous pressure could be located by the location of AE sources.

1. 緒 言

AE 法の極低温への応用, 特に超電導マグネットへの応用が近年盛んに研究され, その有用性が実証されつつある^{1)~3)}。我々はマグネットのみならず, 低温構造物全般への応用を目差しているが, ここでは FRP (Fiber Reinforced Plastics) 製のクライオスタットへの応用研究について述べることにする。

FRP クライオスタットは軽量であることや取扱いが容易であることから, 将来有望なクライオスタットである^{4,5)}。また, 大型のパルスマグネットの運転には電気絶縁性という面から不可欠であるとされているが^{6)~8)}, その安全性や信頼性に関してはまだ不明確な点も多い。特にクライオスタットであるので, 通常のタンクに比較して苛酷な使用条件下(極低温)で使用されかつ要求される性能も厳しい(真空保持)ので, その信頼性や安全性の把握は重要となってくる。さらには一旦事故が起こったならば, その事故の原因を探りかつ

補修ができるように発生箇所を同定する必要がある。

我々は接着構造のクライオスタットを, 製作してきた^{4,5)}。これは, 形状の複雑なクライオスタットや大型クライオスタットのように, 一体成型が困難なクライオスタットの製作を目差したものである。接着構造にすることによって技術上の困難さを克服できるのみならず, 現場施工が可能となり運搬の手間が省略できる等の利点があり, 有望な方法である。ところが逆に, 接着構造であるがゆえに, 接着部の信頼性等の問題が新たに発生する。そこでクライオスタットの監視システムに対する要求も高いものとなる。

こういった観点に立ち, 我々は AE 法の FRP クライオスタットへの inservice inspection としての応用について実験を行ってきた。

具体的には, AE 法を利用したクライオスタット内の液の監視, 内圧増加による破壊の検出及び位置の同定, さらにはカイザー効果によるクライオスタットの経験荷重の推定である。

2. 実験

FRP クライオスタットの実験を行う前に次のような FRP 中の AE 特性についての実験を行った。

- (i) FRP 材料中の AE の伝搬特性
- (ii) 欠陥による AE 減衰特性
- (iii) FRP 材料から発生する AE

上述の実験結果を基にして FRP クライオスタットの監視領域の設定等の計測条件の確立を行った。

FRP クライオスタットに AE センサーを取り付け、液体ヘリウム移送時、突沸時の AE、及び内圧の加減圧時の AE、さらには真空破壊時の AE を計測した。また、真空破壊時の AE の位置標定を行って真空破壊箇所を検出を試みた。

(1) FRP 中の AE

- (i) FRP 材料中の AE 伝搬特性

FRP 材料中の AE の伝搬速度及びその減衰の様子について検討し、位置標定及び監視領域の決定のための基礎データとした。これは FRP 材料には異方性が存在し、AE の伝搬特性にも異方性があると予想されたからである。

伝搬特性の測定には肉厚15mm、直径320mmの円板状の FRP 板を用い、(平織 E-glass 布強化: weight fraction≒65%), 取り付けた2個の AE センサーのうち一方を発信機として使用し、この信号をもう一方のセンサーで受信して伝搬特性を測定した。

Fig. 1 にその伝搬特性の周波数依存性について示した。伝搬速度は周波数に対してあまり変化しないが、減衰能は大きく変化し、周波数が高いほど減衰を起しやすことがわかる。また、伝搬特性の方向依存性は大きく、特に厚さ方向に対して顕著である。これは、繊維に沿った方向への伝搬は繊維を伝わって行われるが、繊維に垂直な方向では逆に繊維によって反射されるためと考えられる。この結果は室温のものであるが、液体窒素温度でも同様の結果が得られた。

- (ii) 欠陥による AE の伝搬特性の変化⁹⁾

FRP クライオスタットに欠陥が入った場合の伝搬特性について調べるために、層間破壊を起こした材料について実験を行った。試料は Fig. 2 に示すように両面にノッチを付けた FRP で、この表裏一對の AE センサーを取り付け、一方を発信器とした。欠陥は試料の長手方向に応力をかけることによって導入され、応力負荷中に発生する AE の計数と、除荷時(無負荷の状態での)減衰特性を測定した。Fig. 3 にその結果

Fig 1 Frequency dependence of AE propagation velocity and attenuation coefficient in FRP.

Fig. 2 Shape and dimensions of tested specimen. The arrangement of AE sensors are also shown.

Fig. 3 Kaiser effect and AE transmittance at RT and LNT.

を示す。減衰特性は負荷前の処女時の受信側の感度を1として示してある。これを見るとAEの発生が急増する時点から減衰も顕著になっており、よく対応していることがわかる。欠陥の導入によって材料自身の減衰の他に6 dB/cm程度の減衰が起こり、これは材料自身の厚さ方向の減衰とほぼ等しく(Fig. 1), 大きな影響を与えるものと考えられる。

(iii) FRP 材料からの AE

FRP 材料自身の特性,あるいは欠陥によって AE の伝搬特性が大きく変化することがわかったが, AE の位置標定等を行う際にはその影響を十分に考慮しなくてはならない。そこで, FRP 材料から発生する AE を分析して特性変化の起こらない応力域を評価した¹⁰⁾。

実験としては, FRP 材料の補強材とマトリックス間の界面破壊の起こる応力レベルを推定するために引張試験を行った。Fig. 4 に液体窒素温度での荷重-変位線図及び AE の計数(リングダウン・モード)と AE の振幅分布の変化の様子について示した。AE の計数は応力レベルで破壊応力の約40%程度から急増しており, これは振幅分布で見ると中程度の振幅の AE の発生と対応していることがわかる。SEM 観察等を併用し, この中程度の振幅の AE が界面破壊に関与すること

が明らかになった。したがって FRP クライオスタットの位置標定等は伝搬部

Fig. 4 Amplitude distribution and load-elongation curve together with corresponding cumulative AE count obtained at LNT in the fiber direction.

Fig. 5 Schematic illustrations of FRP cryostats and set-up of AE sensors.

が破壊力の40%程度以上の応力レベルにある場合にはその評価に補正を施さなくてはならないことになる。

一連の基礎実験で得られた結果から, 本実験に用いるクライオスタットの形状, 大きさを考慮して計測条件が決定された。

(2) FRP クライオスタットへの応用

実験を行ったクライオスタットは大別して2種類のものに分けられる。フィラメントワインディング・パイプに底板を接着したもの (Type 1) 及び側壁を小片の接着で構成し, 底板にステンレス板を接着したもの (Type 2) である。Fig. 5 に各クライオスタットの寸法

法及び形状, AE センサーの取り付け場所を示した。各々のクライオスタットは金属性の外槽に入れて槽間にスーパーインシュレーションを施し, 槽間を真空にすることによってクライオスタットが完成する。いずれの場合にも, 真

空ポンプを切り離して液体ヘリウムを溜めることができることを確認した。なお、クライオスタットには AE センサーの他に歪ゲージ、圧力計及び真空計が取り付けられており、種々の測定が行えるようになっている。

(i) AE による液の状態の監視

Fig. 6 に液体ヘリウム移送時の AE について示した。チャンネル 3 (AE 3) は Type 2 のクライオスタット底部に、チャンネル 1 (AE 1) は上部に装着されたセンサーからの AE であり、同時にカーボン抵抗によって測定したクライオスタット底部の温度も示してある。AE 3 は移送中に多くの AE が発生しているが、AE 1 はあまり発生していない。ところが、液が溜まり始めると (カーボン抵抗が一定値になると) AE の発生が急減することが見てとれる。これは、AE センサーがヘリウムガスの流れを捕えていることが原因と考えられる。つまり、液体ヘリウムが溜まる以前は蒸発ガスの流れが底部で激しく、上部ではゆるやかになるため AE 3 で多く検出される。一方、液が溜まり始めると蒸発ガスが急減してセンサーに捕えられなくなると理解できる。同様の結果は Type 1 のクライオスタット及び液体窒素移送時でも観察された。

また同様に、液の突沸も AE によって検出することができる。Fig. 7 は FRP クライオスタットに液体ヘリウムを溜めておき、約 0.2 kg/cm^2 まで加圧した後に減圧したときの AE 発生を示したものである。図から分かるように減圧時に多くの AE が発生しており、これは減圧に伴う液の突沸を捕えていると考えられる。

Fig. 6 AE count and temperature measured by carbon resistor during liquid helium transfer.

これらの挙動はヘリウムガスの流れ、または液体ヘリウムの沸騰に伴う気泡の発生による音を捕えたもので、厳密には AE と呼べないことになるが、液の状態を監視する方法としては有効であることが分かる。

(ii) 機械的変形に伴う AE

Fig. 7 AE features accompanied with sudden pressure decrease.

Fig. 8 Location of AE sources on type 1 cryostat during pressure test.

まず Type 1 のクライオスタットを用いて、温室での加圧試験に伴う真空破壊箇所的位置標定を試みた。Fig. 8にその結果を示したが、(ゲージ圧 5 kg/cm^2 で真空破壊を起こした)ある部分に AE の発生が集中しており、この付近で真空破壊を起こしたものと予想された。実験終了後、ヘリウムリークディテクターでリーク箇所を同定したところ、AE から予想した箇所と一致し、AE の位置標定の有効性が示された。

次に、接着部の多い Type 2 のクライオスタットの冷却中に発生した AE の位置標定を試みた。なお、ガスによる雑音は AE 1, 2 のみで捕えるので、4 個のセンサー間でコインシデンス処理*を行うことにより除去することができる。冷却中には材料が熱収縮によって変形するものと予想されるが、これに伴う AE を検出することを目的としている。Fig. 9 に AE の発生位置をクライオスタットの展開図の上に示した。これを見ると AE の発生は接着部に集中しているが、若干の誤差が見られる。そこで各標定点からの各センサーまでの距離と振幅の関係を調べてみたところ、センサー 2 で検出される信号に減衰が大きいことが明らかとなった。これはセンサーの圧着状態の不良が原因として考えられ、この影響で各標点はセンサー 2 からの距離が実際よりやや長くなってしまふことになる。この点を考慮すると接着部における応力集中の様子が把握できる。

さて、Type 2 のヘリウム移送試験終了後、クライオスタットに液体窒素を溜めた状態で加圧試験を行った。Fig. 10 に加減圧に伴う AE の発生の様子を示した。加減圧は以下のような過程で行われた。まず 2 気圧まで上げて保持したのち 0 にもどし、さらに 3 気圧まで上げ 0 にもどす。そして 4 気圧、5 気圧と段階的に上昇させていった。この実験において減圧時にはほとんど AE は発生せず、また、加圧時も以前に経験した応力レベルまで AE が発生しない (フェリシティ比 ≈ 1) いわゆるカイザー効果が確認された。このことから、ヘリウム容器の経験応力を推定することができることが分かった。

Fig. 11 に加圧時の AE の位置標定の結果を示した。予冷時と同じく接着部からの AE が多いことが分かる。また、破壊時には大きな振幅の AE が発生しており、この AE は図中に $\times$ 印で示されている。この付近

での真空破壊が予想され、実験終了後にヘリウムリークディテクターで調べたところ、斜線部でリークしていることが判明した。前述のセンサーによる減衰を考慮すると両者はよい一致を示しており、AE の位置標定によるリーク箇所検出が可能であることが分かる。

Fig. 9 Location of AE sources on type 2 cryostat during cooling down process.

Fig. 10 Kaiser effect of FRP cryostat.

Fig. 11 Location of AE sources on type 2 cryostat during pressure test.

* 複数の AE センサーにほぼ同時 (時間差は AE の伝搬速度及び監視範囲から決定する) に到達した AE のみを計測する方法

Fig. 12には加圧時の AE (イベント・カウント) と真空度変化及び歪ゲージの出力を示した。この図から初期の 0 気圧から 4 気圧に内圧を増加させる際に、カイザー効果が見てとれる (3 気圧まで経験済み)。また、この図には真空破壊時の様子も示しており、破壊時に大きな AE の発生が見られ、同時に歪ゲージの出力も大きく変化していることが見てとれる。このように破壊時には大きな弾性波がクライオスタット全体に伝搬していき、その一部を AE センサー及び歪ゲージで検出していることが分かる。

3. 結 論

FRP クライオスタットの監視に AE 法を応用し、次のような結論を得た。

- (1) 液の状態の監視が可能である。特にガスの発生が検出できる。
- (2) クライオスタットの圧力(応力)履歴が明らかとなる。
- (3) 位置標定が可能であり、特にリーク箇所を同定できる。

これらの手法が低温でも可能であるということが明らかとなり、AE 法の低温への応用の新しい可能性を示すものと考えられる。

なお、本研究の一部は、科学技術庁振興調整費による「超電導・極低温基盤技術の開発に関する研究」及び文部省科学技術研究費 No. 59050044 の一環として行われたものである。

参 考 文 献

- 1) H. Nomura, M. W. Sinclair and Y. Iwasa: *Cryogenics* **20** (1980) 283.
- 2) M. W. Sinclair, O. Tsukamoto and Y. Iwasa: *IEEE Trans. Magn.* **MAG-17** (1981) 1064.
- 3) M. Pappé: *IEEE Trans. Magn.* **MAG-19** (1983) 1086.
- 4) Y. Tsuchida, Y. Kuraoka, S. Nishijima and T. Okada: *Proc. ICEC-10, Helsinki* (1984) 672.
- 5) K. Fujioka, Y. Tsuchida, Y. Kuraoka, Y. Kawate, T. Horiuchi, S. Nishijima and T. Okada: Presented at CEC, Colorado Springs (1983) EB-3.
- 6) 倉岡泰郎, 細田典秀, 西嶋茂宏, 岡田東一: *低温工学* **17** (1982) 332.
- 7) 別所久美, 細田義門, 笹島洋一, 川島真生: *低温工学* **17** (1982) 322.
- 8) 伊藤大佐, 豊田 隆, 羽入田利明: *低温工学* **17** (1982) 326.
- 9) S. Nishijima, T. Okada and S. Namba: To be published in *Nonmetallic Materials and Composites at Low Temperatures 3* Plenum Press, New York.
- 10) S. Nishijima, T. Okada and S. Namba: *Adv. Cryo. Eng.* **30** (1984) 25.

Fig. 12 AE count, output of strain gauge and vacuum gauge during pressure test.