

JAERI-Review

2005-006



JP0550112



TRACY安全棒誤作動(2004年6月17日発生)に
関する調査報告書

2005年3月

TRACY安全棒誤作動原因調査アドホック委員会

日本原子力研究所

Japan Atomic Energy Research Institute

本レポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。

入手の問合わせは、日本原子力研究所研究情報部研究情報課(〒319-1195 茨城県那珂郡東海村)あて、お申し越し下さい。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター(〒319-1195 茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内)で複写による実費頒布を行っております。

This report is issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Research Information Division, Department of Intellectual Resources, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 〒319-1195, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 2005

編集兼発行 日本原子力研究所

TRACY 安全棒誤作動（2004 年 6 月 17 日発生）に関する調査報告書

日本原子力研究所東海研究所
TRACY 安全棒誤作動原因調査アドホック委員会

（2005 年 1 月 27 日受理）

日本原子力研究所東海研究所の過渡臨界実験装置（TRACY）において、平成 16 年 6 月 17 日に、過渡出力運転を実施していたところ、安全棒 1 本が炉心に挿入される事象が発生した。

日本原子力研究所は、平成 16 年 6 月 23 日に所内の専門家からなる「TRACY 安全棒誤作動原因調査アドホック委員会」を組織し、安全棒の誤作動に関する原因調査及び対策に関する検討を実施した。

アドホック委員会は、計 11 回の会議を開催し、TRACY の関連課室から原因調査及び対策に関する報告を聴取し、調査審議を行った。その結果、安全棒が誤作動した原因は、安全棒装置の分解組立て時に混入したポリエチレンシート小片が電磁石とアーマチュアの間に入り込まれ、安全棒保持力が低下していたためであることが判明した。

本報告書は、この安全棒誤作動に関する調査結果及び対策について報告するものである。

Report of Investigation on Malfunction of Safety Rod (Occurred on June 17, 2004)
in TRACY

The Ad-hoc Committee for Investigation on Malfunction of Safety Rod in TRACY

Tokai Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received January 27, 2005)

A trouble, malfunction of a safety rod, occurred during transient operation of the Transient Experiment Critical Facility (TRACY) in Japan Atomic Energy Research Institute (JAERI) on June 17, 2004. JAERI organized its specialists into the ad-hoc committee for investigation on malfunction of a safety rod of TRACY on June 23, 2004, to understand the cause of the trouble and take countermeasures to prevent the issue.

The ad-hoc committee held 11 meetings and had discussions on the trouble inquiring the situations of the TRACY operation and the results of examination from the division relevant to the TRACY. As the result of investigation the cause of the trouble was attributed to the following reason: The holding capability of the safety rod was temporarily depressed by a small piece of polyethylene sheet put between the electromagnet and armature of the safety rod, the polyethylene sheet which had been used in overhaul activities of the rod. In the present report, the detailed results of investigation and the countermeasures to prevent the trouble are described.

Keywords: TRACY, Safety Rod, Malfunction, Investigation, Ad-hoc Committee

目次

1. はじめに	1
2. 施設設備の概要	1
2.1 TRACY 施設の概要	1
2.2 安全棒装置の概要	2
3. 事象の概要	2
4. 調査方針及び審議状況	3
4.1 調査方針	3
4.2 審議状況	5
5. 調査結果	5
5.1 安全棒に作用する外力の増加	5
5.1.1 炉心タンク気相部圧力の増加	5
5.1.2 安全棒ピストン上部への伝播圧力の増加	6
5.1.3 調整トランジェント棒引抜時の機械的衝撃力の増加	7
5.2 安全棒保持力の低下	8
5.2.1 電磁石回路の電氣的異常	8
5.2.2 安全棒の機械的異常	11
5.2.3 安全棒保持力の経年変化	11
5.3 その他の発生機構の可能性	13
5.4 安全棒Aで発見された異物の調査	13
5.4.1 異物の混入時期及び経路の調査	14
5.4.2 異物の挟み込みによる電磁石吸着力への影響の調査	15
6. まとめ及び対策	16
7. おわりに	17

Contents

1. Introduction	1
2. Outline of TRACY	1
2.1 Outline of TRACY Facility	1
2.2 Outline of Safety Rod System	2
3. Detail of Issue	2
4. Procedures on Investigation and Record of Committee Meetings	3
4.1 Procedures on Investigation	3
4.2 Record of Committee Meetings	5
5. Results of Investigation	5
5.1 Increase of Force Working on Safety Rod	5
5.1.1 Increase of Core Tank Plenum Pressure	5
5.1.2 Increase of Pressure Working on Safety Rod	6
5.1.3 Increase of Impact Force by Transient Rod Withdrawn	7
5.2 Decrease of Holding Capability of the Safety Rod	8
5.2.1 Electrical Wrong with Electric Magnet Circuit	8
5.2.2 Mechanical Wrong with Safety Rod System	11
5.2.3 Time Change of Holding Capability of the Safety Rod	11
5.3 Capability of Other Cause Mechanism	13
5.4 Investigation on Small Pieces in Safety Rod System A	13
5.4.1 Investigation on Timing and Pass of Small Pieces	14
5.4.2 Investigation on Effect of Depression of a Small Piece	15
6. Summary and Countermeasures	16
7. Remarks	17

TRACY安全棒誤作動原因調査アドホック委員会構成員

リーダー： 吉田善行 東海研究所副所長
サブリーダー： 石島清見 安全性試験研究センター長
平野雅司 原子炉安全工学部長※
安濃田良成 安全性試験研究センター計画調査室長※
渡邊憲夫 原子炉安全工学部安全評価研究室主任研究員
寺門義文 原子炉安全工学部NSRR管理室長
船山佳郎 研究炉部次長
新井信義 研究炉部JRR-4管理課第2係長・課長代理※
アドバイザー： 入江吉郎 大強度陽子加速器施設開発センター加速器グループ
主任研究員・次長（平成16年6月末まで参加）
事務局： 安全試験部, 燃料サイクル安全工学部

※：平成11年の安全棒不具合原因調査時のアドホック委員会メンバー

This is a blank page.

1. はじめに

平成16年6月17日に、過渡臨界実験装置 (TRACY) において、施設定期自主検査の一環として添加反応度 2.97 \$ のパルス引抜による過渡出力運転 (出力急上昇試験) を行ったところ、炉心タンク上部で待機状態にあった安全棒3本のうちの1本 (安全棒A) が炉心に挿入される事象が発生した。

日本原子力研究所 (原研) は、平成16年6月23日に所内の専門家からなる「TRACY 安全棒誤作動原因調査アドホック委員会 (以下、アドホック委員会という。)」を組織し、安全棒の誤作動に関する原因調査及び対策を検討することとした。

アドホック委員会は、平成16年6月23日以降計11回の会議を開催し、TRACY 関連課室から調査に関する報告を聴取するとともに、追加的な調査及び検討を TRACY 関連課室に要請し、調査審議を行った。

本報告書は、この安全棒誤作動に関する調査結果及び対策について取りまとめたものである。

2. 施設設備の概要

2.1 TRACY 施設の概要

原研東海研究所の過渡臨界実験装置 (TRACY : Transient Experiment Critical Facility) は、再処理施設の安全評価において想定される臨界事故に関する実験データを取得することを目的とした臨界実験装置で、平成7年12月20日に初臨界を達成し、平成8年から臨界事故を模擬する過渡出力運転を実施している。

TRACYの概要を表1に示す。TRACYは、ウラン濃縮度約10 wt%のウラン硝酸水溶液を燃料とし、最大熱出力は、定出力運転時10 kW、過渡出力運転時5000 MWである。TRACYの施設概要を図1に、臨界制御概念を図2に示す。TRACYにおける臨界事故を模擬する過渡出力運転は、炉心タンク中央に設置されている調整トランジェント棒の引抜き又は給液ポンプによる燃料の給液により行われ、最大で3.0 \$までの反応度を添加する。TRACYを緊急に停止させる場合は、安全棒及び調整トランジェント棒を炉心タンク内に挿入するとともに炉心タンク内の溶液燃料をダンプ槽に排液する。

2.2 安全棒装置の概要

今回誤作動した安全棒装置は、緊急時にTRACYを停止させるためのもので、TRACYの炉心タンクの上部に3基(A~C)設置されている。安全棒装置の概念を図3に、断面を図4に示す。安全棒装置は、安全棒と安全棒駆動装置から構成される。安全棒は、外径62 mm、全長2 mのステンレス鋼製のさや管内に炭化ホウ素ペレット(天然ホウ素、外径54.6 mm、有効長1136 mm)を充てんした構造で、総重量は323.6 N (33 kgf)である。安全棒のピストン部にはパッキンが取り付けられ、ピストン上部を真空にし、パッキンを介した上下部の圧力差により、安全棒は引き上げられる構造となっている。真空により上限まで引き上げられた安全棒は、安全棒電磁石により吸着保持される構造となっており、励磁電流が3.0 Aに設定され、951 N (97 kgf)の保持力を有する。安全棒は、緊急時に電磁石の励磁電流を自動遮断することにより、スクラム信号発生後1.5秒以内に炉心タンク内に挿入される。安全棒上端の電磁石との吸着面には、安全棒が残留磁場に打ち勝ち、電磁石から離れやすくするために反跳バネ及び0.5 mmの間隙を設けるための円環状の突起(外径29 mm、内径24 mm)が取り付けられている。

TRACY安全棒配管系統を図5に示す。安全棒装置と炉心タンクは、図示のように、炉心タンク上部においてクランプ継手で接続されている。安全棒駆動装置の上部及び下部の給排気ノズルは、逆止弁、炉心タンク均圧弁、バイパス弁等を介して炉心タンクに連結されている。この炉心タンク均圧系配管は、過渡出力運転に伴い炉心タンク内の圧力が上昇した場合でも、安全棒駆動装置内ピストンの上部、下部を均圧にして、安全棒の炉心タンクへの挿入を妨げないように設計されている。なお、安全棒駆動装置内には、圧空槽から常時、空気を供給している。これは、炉心タンクで発生する放射性ミストが安全棒駆動装置内部に流れ込まないようにするためのものである。また、バイパス弁は、安全棒挿入時の空気の流出入を調整し、安全棒の駆動を円滑に行うために、安全棒駆動装置毎に設置されている。

3. 事象の概要

TRACY施設は、平成15年12月8日から平成16年7月8日までの計画で、施設定期検査及び施設定期自主検査を実施していた。平成16年4月14日に1回目の施設定期検査(インターロックの確認等)を、平成16年6月14日に2回目の施設定期検査(定出力運転における性能確認

等)を終え、平成16年6月17日に施設定期自主検査に係る性能確認のため、添加反応度2.97\$のパルス引抜による過渡出力運転(ラン番号R286、出力急上昇運転)を行っていた。R286における運転操作の時系列を表2に示す。この日は、13時51分に原子炉を起動し、15時56分から過渡出力運転を開始した。16時10分に、炉心タンク内に挿入状態であった調整トランジェント棒を0.2秒で引き抜き瞬時に反応度を添加して、パルス状の出力を発生させた直後、炉心タンク上部で待機状態にあった安全棒3本のうちの1本(安全棒A)が炉心タンク内に挿入された。安全棒の挿入に伴ってインターロックが作動し、排液弁が開動作して炉心タンクの溶液燃料がダンプ槽(燃料貯槽)に排液され、引抜状態にあった調整トランジェント棒も炉心タンク内に自動挿入された。R286における出力履歴及び調整トランジェント棒が挿入された時刻を図6に示す。調整トランジェント棒を引抜き開始後、0.16秒後に出力はピークに達し、その後、放射線分解ガスボイドの生成・成長及び溶液温度上昇による負のフィードバック反応度効果により通常どおり出力は降下していた。反応度添加のために引抜かれた調整トランジェント棒は、前述のとおり安全棒誤挿入に伴うインターロック作動により調整トランジェント棒引抜き開始後0.75秒に炉心タンクへ挿入を開始し、1.58秒に挿入を完了していた。

その後、安全保護回路のスクラム信号が発生していないこと、3本の安全棒の電磁石には、電流が供給された励磁状態であることから、安全棒Aが誤作動したものであることを確認し、残り2本の安全棒を手動で挿入して原子炉を停止させた。

また、R286運転中の排気筒及び原子炉建家内の放射線モニタの指示値は通常範囲内であり、周辺公衆及び放射線作業従事者への放射性物質による影響はなかった。

4. 調査方針及び審議状況

4.1 調査方針

TRACY施設の安全棒については、平成11年7月12日及び7月21日に不具合事象(11原研05第107号にて科学技術庁長官(現 文部科学大臣)に報告。以下「前回事象」と言う。)が発生していることから、今回の安全棒誤作動の原因調査をするにあたり、前回事象との類似性について調べた。前回事象は、図7に示すように、「過渡出力運転時に炉心タンク気相部で上昇した圧力が炉心タンク均圧系配管を経由して安全棒Aピストン上部に伝播し安全棒を落下させる外力として働いたとき、この外力が過去最大であり、その外力に比べて安全

棒を保持する力（以下、安全棒保持力という。）が十分ではなかったこと」によるものであった。前回事象時においては安全棒及び調整トランジェント棒の挿入時刻が測定されていたが、今回の運転においては安全棒が誤挿入された時刻は測定されていなかった。そこで、今回の安全棒誤作動について、前回事象との類似性を調べるために、安全棒挿入に伴うインターロックで自動挿入された調整トランジェント棒の挿入時刻について、前回事象と今回の事象を比較することとした。前回及び今回の調整トランジェント棒自動挿入時刻の比較した結果を図8に示す。図8に示すように、出力ピークから調整トランジェント棒が挿入を開始するまでに要した時間（約0.6秒）がほぼ一致したこと、また、安全保護回路が作動していないこと、3本の安全棒の電磁石すべてが励磁していた状態で安全棒1本が誤作動し残り2本の安全棒は上限で保持されていたことなどから、今回の事象は前回事象と類似していることが判明した。前回事象については、前述したように原因を特定し、再発防止策として、過去最大となった外力に耐え得るよう、全安全棒の電磁石励磁電流を2.6 Aから3.0 Aに引き上げ、安全棒Aについては安全棒保持力の余裕（安全棒保持力から安全棒の自重を差し引いた力）を約137 N(14 kgf)増の約412 N(42 kgf)とした（以下「前回主対策」と言う。）。さらに、炉心タンク均圧系配管にオリフィスを設置し、安全棒ピストン上部に作用する外力を緩和することで安全棒の誤作動防止に対する確実性を高めた（以下「前回補助対策」と言う。）。オリフィス設置により安全棒ピストン上部と炉心タンク気相部との圧力の均圧に要する時間は0.1秒程度長くなると考えられるが、安全棒の落下時間（1.5秒以内）に比べて十分小さいため、安全上の影響を与えるものではない。

それにもかかわらず今回安全棒誤作動事象が発生したことから、その原因究明に当たっては、①前回主対策の効果を上回る外力の増加、及び②前回主対策を相殺する安全棒保持力の低下について重点的に調査することとした。また、前回事象とは異なる発生機構も考える必要があるとの判断から、③その他の発生機構の可能性についても調査することとした。

以上の調査方針に係る検討を踏まえ、事象再現性の観点から、安全棒誤作動について、一次的要因、二次的要因、考えられる要因に細分化して図9に示す要因分析調査フローを作成し、調査した。安全棒誤作動の発生機構については、前回事象と同一の場合及びその他の発生機構に分類した。発生機構が前回事象と同一の場合については、一次的要因として、安全棒に作用する外力そのものが増加した場合、安全棒保持力が低下した場合の2つを考えた。これらの一次的要因を二次的要因に細分化し、それらを確認するために個別具体化した考えられる要因について調査することとした。発生機構が前回事象と異なるものにつ

いては、その他の発生機構とし、安全棒そのものに作用する外力として、溶液燃料の液塊が安全棒へ衝突する事象の可能性について調べた。

4.2 審議状況

アドホック委員会は、平成16年6月23日以降計11回の会議を開催し、TRACY関連課室から調査に関する報告を聴取するとともに、必要な追加的な調査、検討をTRACY関連課室に要請し、調査審議を行った。調査審議の経過を表3に、原因調査等の工程を表4に示す。

5. 調査結果

5.1 安全棒に作用する外力の増加

安全棒に作用する外力の増加について、炉心タンク気相部で発生する圧力そのものの増加、安全棒ピストン上部へ伝播する圧力の増加、及び調整トランジェント棒のパルス引抜きに伴い安全棒に伝わる衝撃力の増加に分類し、調査を行った。なお、「5.2.3 安全棒保持力の経年変化(1) 電磁石吸着性能の劣化 C 安全棒電磁石単体の吸着力の測定」、「同節(2) 反跳バネの性能劣化」及び「5.4.2 異物の挟み込みによる電磁石吸着力への影響の調査」を除いた調査については、安全棒装置を分解点検する前(異物が混入した状態)に実施した。

5.1.1 炉心タンク気相部圧力の増加

炉心タンク気相部圧力は、過渡出力に伴い溶液中で放射線分解ガスボイドが生成・成長し、溶液面が上昇すると、炉心タンク気相部のガスが圧縮され、上昇するものである。この炉心タンク気相部圧力は、過渡出力運転において通常的に測定されるものではなく、今回の安全棒誤作動時においても測定されていなかった。放射線分解ガスボイドの生成量・生成速度は、添加反応度、積分出力、ピーク出力に依存すると考えられることから、今回の運転において、気相部でこれまで以上の圧力が発生していなかったことを確認するために、添加反応度、積分出力及びピーク出力を調査した。平成11年度の安全棒誤作動事象発生以降に行った、添加反応度が約3\$の過渡出力運転における添加反応度、ピーク出力、積分出力等の運転データを表5に示す。今回安全棒が誤作動したR286について、添加反応度は2.97 \$、最大ピーク出力は1600 MW、積分出力は19.6 MJであり、平成11年7月12日及び21日

に実施した過去最大規模試験（添加反応度3.00 \$）に比べ添加反応度、ピーク出力及び積分出力は小さいことから、炉心タンク気相部圧力はこれまでの最大規模の過渡出力運転を超えていなかったものと考えられる。

また、安全棒誤作動時の過渡出力運転が運転制限値を逸脱せず正常に行われていたことを調査するため、原子炉設置変更許可申請書、運転記録及び施設定期自主検査記録を確認したところ、運転操作及び計器の較正は適正に行われており、添加反応度、積分出力及びピーク出力に異常は認められなかった。

以上の調査結果により、安全棒A誤作動の原因は、炉心タンク気相部圧力の増加によるものではないと判断した。

5.1.2 安全棒ピストン上部への伝播圧力の増加

安全棒駆動系配管に設置された弁が閉止状態であったり、炉心タンクベント系配管（図5参照）が閉塞傾向にあると、過渡出力運転に伴い炉心タンク気相部で発生した圧力の伝わる範囲が減少することにより、炉心タンク均圧系配管を経由して安全棒ピストン上部に伝播する圧力が増加することが考えられる。そこで、安全棒駆動系配管の弁状態、炉心タンクベント系配管及びオリフィスの状況について以下の調査を行った。

（1）安全棒駆動系配管の弁状態の異常

今回安全棒が誤作動したR286において、安全棒駆動系配管に設置されている弁の状態が、正常な設定状態になっていたことを確認するため、現場において手動弁の状態を、分散型デジタル制御装置（DDCS）において自動弁の状態を調査した。調査の結果、弁状態に異常は認められなかった。

（2）炉心タンクベント系配管の閉塞

炉心タンクベント系配管内部の点検は、特に炉心タンク気相部圧力の上昇に寄与すると思われる炉心タンク出口配管について行うこととし、図10に示す箇所について、内視鏡（オリンパス製ビデオスコープPT400）を挿入し、配管内部の状況を調査した。調査の結果、図11に示すように、配管内面に溶液燃料の析出物が若干認められたものの、ベント系配管の閉塞に到るような兆候は認められなかった。

（3）オリフィスの異常

過渡出力運転時に炉心タンク内で発生した圧力は、炉心タンク均圧系配管を経由して安全棒ピストン上部に伝播する。この伝播圧力を緩和するために設置されたオリフィスについて、腐食等により穴径が大きくなる等の異常が発生すると、安全棒ピストン上部へ伝播

する圧力が増加し、安全棒 A を押下げることが考えられる。このため、炉心タンク均圧系配管に設けられたオリフィスの状態について調査した。調査の結果、オリフィスに異常は見られないことを確認した。

以上の調査結果により、安全棒A誤作動の原因は、安全棒ピストン上部への伝播圧力の増加によるものではないと判断した。

5.1.3 調整トランジェント棒引抜時の機械的衝撃力の増加

調整トランジェント棒の据付不良又は衝撃緩衝器の故障により調整トランジェント棒引抜時に安全棒に伝わる機械的衝撃力が増加することが考えられたため、調整トランジェント棒装置の据付状態、及び調整トランジェント棒のパルス引抜きに伴う衝撃力が安全棒に及ぼす影響について以下の調査を行った。

(1) 調整トランジェント棒装置の据付状態の異常

炉心タンクに据え付けた調整トランジェント棒装置の据付状態に異常があると、調整トランジェント棒パルス引抜き時に所定の緩衝効果が得られず、安全棒に伝わる衝撃力を増加させることが考えられるので、調整トランジェント棒装置の据付状態について、鉛直度の測定、据付ボルトの緩みの有無を調査した。調査は、図 12 に示すように、調整トランジェント棒駆動装置に下振り垂らし、同装置と下振り糸との距離を、調整トランジェント棒駆動装置の上・下部（測定点間隔：1.0 m）について、測定した。調査の結果、測定点間隔 1.0 m に対して、測定した調整トランジェント棒駆動装置の上・下部の距離の差は、1.0 mm であり、調整トランジェント棒駆動装置の鉛直度は基準値以内（1000 分の 1 以下の傾き）であった。また、据付ボルトの緩みもなかった。このことから、異常は認められなかった。

(2) 調整トランジェント棒引抜時の異常振動

安全棒を定格励磁電流（3.0 A）で励磁吸着させた状態（炉心タンクに溶液燃料がない状態）で調整トランジェント棒のパルス引抜き駆動を行い、調整トランジェント棒の引抜時の衝撃により安全棒が誤挿入しないことを調査した。調査の結果、定格励磁電流（3.0 A）で励磁吸着させた状態において、調整トランジェント棒のパルス引抜き駆動を5回行ったが、いずれの安全棒も誤作動することはなかった。

次いで、調整トランジェント棒パルス引抜き時の衝撃に対する安全棒への影響を調べるために、安全棒の励磁電流の設定を段階的に下げて、調整トランジェント棒の引抜き駆動を行い、調整トランジェント棒引抜時の衝撃力により安全棒が誤作動する励磁電流を測定

した。測定の結果、表 6 に示すように、それぞれの安全棒が誤作動する励磁電流は、安全棒 A が 2.10 A (試験番号 7 参照)、安全棒 B が 1.75 A (試験番号 14 参照)、安全棒 C が 1.80 A (試験番号 12 参照) であった。このことから、調整トランジェント棒引抜き時の衝撃力に対して、安全棒 A が誤作動するときの励磁電流が高く、他の安全棒に比べて影響を受けやすい状況にあることを確認した。

また、調整トランジェント棒引抜き時に安全棒に伝わる振動特性について、図 13 に示すように、安全棒駆動装置 A~C の上端に 3 軸加速度計 (共和電業製 AS-50TB、定格容量 50 G) を設置し、調査した。前述したとおり、今回の運転において安全棒が誤挿入された時刻は測定されていなかったため、安全棒の挿入に伴うインターロックにより挿入された調整トランジェント棒の挿入開始時刻から安全棒が誤挿入された時刻を推定することとした。安全棒が誤挿入した時刻は、図 8 に示す前回事象との比較から、調整トランジェント棒引抜き開始から 0.38 秒後と推定される。安全棒駆動装置 A について、図 14 に示すとおり調整トランジェント棒パルス引抜き時の衝撃に伴い振動しているが、約 0.04 秒後に振動は減衰していることから、安全棒 A に対して、調整トランジェント棒の引抜きによる衝撃力の影響はないことを確認した。したがって、調整トランジェント棒引抜き時の機械的衝撃力は今回の安全棒誤作動の要因ではないことを確認した。

以上の調査結果により、安全棒 A 誤作動の原因は、調整トランジェント棒引抜き時の機械的衝撃力の影響によるものではないと判断した。

5.2 安全棒保持力の低下

安全棒保持力の低下について、安全棒を吸着する電磁石の回路の電氣的な異常、安全棒の据付不良、電磁石吸着面の接触不良等の機械的な要因により安全棒保持力の低下、電磁石単体の吸着力、反跳バネ強度等が経年変化による保持力の低下について調査した。

5.2.1 電磁石回路の電氣的異常

安全棒電磁石回路の電氣的異常により安全棒保持力が低下していることが考えられたため、電磁石回路の電氣的異常について以下の調査を行った。

(1) 電磁石の電気抵抗の増加

安全棒電磁石の電気抵抗が増加すると、電磁石電流が減少し、安全棒保持力を低下させることが考えられたため、電磁石の電気抵抗を調査した。安全棒電磁石単体の電気抵抗は、安全棒装置に電磁石が組み込まれた状態で、安全棒装置上端の端子からテスター (横河電

機製 7533-05) で測定された。調査の結果、電気抵抗は、安全棒 A が 1.25 Ω 、安全棒 B が 1.22 Ω 、安全棒 C が 1.23 Ω であり、設計値 (1.20 $\Omega \pm 10\%$) を満足しており異常は認められないことを確認した。

(2) 電磁石励磁回路の絶縁抵抗の減少

電磁石励磁回路の絶縁抵抗が低下すると、電磁石電流が減少し、安全棒保持力を低下させることが考えられたため、電磁石励磁回路の絶縁抵抗を調査した。調査は、電磁石電源装置の出力端子を取外し、出力端からスクラム遮断回路を介し電磁石までのケーブルを含む絶縁抵抗をメガー (sanwa 製 DM5218S) で測定した。調査の結果、絶縁抵抗は、すべて 1000 M Ω 以上であり、設計値 (100 M Ω 以上) を満足しており異常は認められないことを確認した。

(3) 電磁石励磁回路の損傷等の異常

電磁石励磁回路に損傷、緩み等があると、電磁石に規定の電流を供給できず安全棒保持力を低下させることが考えられるため、制御盤及び安全棒装置等の配線、コネクタ、リレー等について、焼付け、配線のゆるみ、機器の損傷の有無を目視等により調査した。調査の結果、焼付け、配線のゆるみ、機器の損傷等の異常は認められないことを確認した。

(4) 電磁石励磁電流の漏電

電磁石電源から供給される電流に漏電があると、電磁石に規定の電流が供給されず、安全棒保持力を低下させることが考えられたため、電源部と負荷部の電流の調査を行った。調査の結果、電磁石電源回路には漏電がなく、電磁石へ規定の電流が供給されていることを確認した。

(5) 安全棒電磁石の連続通電による影響

安全棒電磁石へ励磁電流を連続通電することにより電磁石が発熱し、励磁コイルの電気抵抗が増加し、安全棒保持力が低下することが考えられたため、連続通電により安全棒が落下するかどうか調査した。運転開始から安全棒 A の誤挿入事象が発生するまでの時間 (約 2 時間) を上回る 3 時間の連続通電を実施し、連続通電による影響を調査した。調査の結果、励磁コイルの電気抵抗の変化はなく、連続通電中にいずれの安全棒も誤挿入されることはなかった。このことから、安全棒電磁石の連続通電による影響により安全棒が誤作動することはないことを確認した。

(6) ノイズによる励磁電流の低下に対する調査

a. TRACY 以外からのノイズ飛来

TRACY 以外から飛来するノイズによって電磁石励磁電流が低下し、安全棒を落下させるこ

とが考えられるため、誤作動が発生した時刻において、TRACY 以外でノイズ発生作業（高周波加熱器の使用、溶接作業等）がなかったか聞き取り調査が行われた。調査の結果、該当する作業は行われていなかったことを確認した。

b. TRACY の機器からのノイズ飛来

TRACY の機器（調整トランジェント棒、ブロワ、ヒーター類）から発生したノイズによって電磁石励磁電流が低下し、安全棒を誤挿入させることが考えられるため、安全棒を上限待機させた状態で、これらの機器を作動させ、電磁石の励磁電流回路にノイズが発生するか調査した。調査は、安全棒電磁石電源装置の出力端子を取外し、オシロスコープ（横河電機製）を並列に取り付け、電磁石電源装置からスクラム遮断回路を介して電磁石までの間の励磁電圧の変動を測定し、励磁電流の変動に換算した。測定の結果、図 15 (3/4) に示す第 3 よう素吸着塔ヒーターの作動に伴って生じたノイズにより、電磁石の励磁電流が最大で瞬時的（数 μs ）に 27 %程度低下することを検知したが、上限待機していた安全棒が誤挿入することはなかった。

c. 放射線によるノイズ飛来

TRACY の過渡出力運転によって炉心から発生する放射線（中性子線、ガンマ線）により電氣的ノイズが発生し、安全棒電磁石励磁電流が低下し、安全棒を落下させることが考えられる。しかしながら、安全棒 A が誤挿入したと推定される時刻（調整トランジェント棒の引抜き開始から 0.38 秒後）は、放射線量率が最大となる出力ピーク時刻（調整トランジェント棒の引抜きから 0.17 秒後）とずれていることから、放射線による電氣的ノイズが影響したとは考えられないことを確認した。

(7) 励磁電流の誤設定

安全棒電磁石の励磁電流は、安全棒励磁中、電磁石電源装置によって 3.0 A に設定されている。電磁石電源装置の励磁電流値は、安全棒誤作動発生時のまま設定が維持されていたことから、安全棒誤作動時に供給されていた励磁電流を調査した。調査は、電磁石電源装置の出力端子を取外し、テスター（横河電機製 7533-05）を直列に取付け、電磁石電源装置からスクラム遮断回路を介して、電磁石までの間の励磁電流を測定した。調査の結果、電磁石の励磁電流は、安全棒 A は 2.99 A、安全棒 B は 3.00 A、安全棒 C は 3.05 A であり、誤設定されていなかったことを確認した。

以上の調査結果により、安全棒 A 誤作動の原因は、電磁石回路の電氣的異常によるものではないと判断した。

5.2.2 安全棒の機械的異常

安全棒の据付不良、電磁石吸着面の接触不良等の機械的な要因により安全棒保持力が低下していることが考えられたため、安全棒の据付状態及び電磁石の吸着状態の調査を行った。なお、本調査は、安全棒装置を分解点検（異物混入を確認）する前に行ったものである。

(1) 安全棒駆動装置の据付状態の異常

炉心タンクに据え付けた安全棒駆動装置の鉛直度に異常があると、電磁石と安全棒の接触面に傾きが生じ、安全棒保持力を低下させることが考えられたため、安全棒駆動装置の据付状態を調査した。調査は、安全棒駆動装置に下振りを垂らし、同装置と下振り糸との距離を、安全棒駆動装置の上・下部（測定点間隔：1.4 m）について、測定した。調査の結果、測定点間隔1.4 mに対して、測定した安全棒駆動装置上・下部の距離の差は、1.0 mmであり、安全棒の鉛直度は基準値以内（1000分の1以下の傾き）であった。安全棒の鉛直度が1000分の1以内であれば、電磁石と安全棒の接触面に生じる隙間は最大でも0.03 mm以下であり、それによる保持力低下は9.8 N（1 kgf）以下と十分小さいことを確認した。

以上の調査結果により、安全棒A誤作動が安全棒駆動装置の据付不良によるものではないと判断した。

(2) 電磁石吸着面の吸着状態の異常

安全棒と電磁石の吸着状態に異常があると、安全棒保持力を低下させることが考えられたため、安全棒装置を分解し、安全棒と電磁石の吸着面を調査した。安全棒装置の分解点検は、電磁石側から行われた。安全棒を引出す前に、蓋板、電磁石を取り出し、シリンダ内を外観確認したところ、電磁石とアーマチュアの隙間から図16に示す異物2片が発見された。異物の一つは、長さ約13 mm、幅約5 mm、厚さ約0.2 mmのポリエチレンシート小片で、他方は、長さ約3 mm、幅約1 mm、厚さ約0.05 mmの金属小片（オーステナイト系ステンレス鋼 SUS304）であった。また、安全棒Aの電磁石とアーマチュアの接触箇所には、図17に示すように、異物が挟み込まれたことにより生じたと思われる痕跡があることを確認した。一方、安全棒装置B及びCには、異物、有害な傷等がないことを確認した。

以上の調査結果により、安全棒Aから発見された異物及びそれが安全棒保持力に及ぼす影響について詳細な調査を行う必要があると判断した。調査結果については、第5.4節で述べる。

5.2.3 安全棒保持力の経年変化

安全棒保持力は、電磁石単体の吸着力、反跳バネ強度等に依存することから、これらの

性能が経年変化したことが考えられることから、以下の調査を実施した。

(1) 電磁石吸着性能の劣化

a. ドロップアウト電流の測定

安全棒保持力の経年変化を計る指標として、前回事象発生以降、安全棒を励磁吸着させた状態で電磁石の励磁電流を徐々に下げ安全棒が自重落下するときの電流（ドロップアウト電流）の測定を行っている。そこで、これまでに行ったドロップアウト電流の測定値の変化傾向について調査した。なお、本調査は、安全棒装置を分解点検（異物混入を確認）する前に行ったものである。これまでに測定したドロップアウト電流値は、図18に示すとおり若干変動しているものの、安全棒保持力に大きな経年変化は認められないことを確認した。

b. 安全棒加圧落下試験

安全棒保持力の実際の使用状態における余裕を調査するため、図19に示すように、安全棒装置をメンテナンス用グローブボックスの上部に設置して、安全棒ピストン上部を加圧して安全棒が挿入されるときに圧力を測定し、励磁電流をパラメータとして安全棒保持力の余裕を評価した。安全棒保持力の余裕は、測定した圧力に安全棒アーマチュア部断面積を掛けて算出した安全棒挿入に必要な外力から安全棒の自重を減じて求めた。なお、本調査は、安全棒装置を分解点検（異物混入を確認）する前に行ったものである。調査の結果、図20に示すように、測定した安全棒保持力の余裕は、安全棒A、B及びCともに平成11年度の測定値とほぼ同様であることが示され、実際の使用状態においても安全棒保持力の余裕が経年変化していないことを確認した。

c. 安全棒電磁石単体の吸着力の測定

安全棒電磁石単体の吸着力の個体差を調査するため、安全棒上端に取付けられている反跳バネ（消磁時における安全棒電磁石の残留磁場に対してアーマチュアが速やかに離れるようにするために取付けられたバネ）を取り外した状態において、図21に示す安全棒電磁石吸着力測定装置を用いて、安全棒A～Cの電磁石及びアーマチュアを用いて安全棒電磁石単体の吸着力を測定した。測定装置は、安全棒電磁石とアーマチュアを吸着させた状態で、エアシリンダに圧縮空気を供給し、安全棒電磁石からアーマチュアを引き離すときの圧力を測定し、吸着力を算出するものである。調査の結果、図22に示すとおり、安全棒Aの電磁石単体の吸着力は、約951.2 N (97 kgf) であった。安全棒B、Cの電磁石単体の吸着力は、安全棒Aのに対し、それぞれ約24.5 N (2.5 kgf)、約39.2 N (4 kgf) 大きい値であった。この傾向は、図20に示した実際の使用状態における安全棒保持力の大小関係を裏付けるも

のであることを確認した。

(2) 反跳バネの性能劣化

安全棒の反跳バネは、安全棒が電磁石に吸着されているとき、常に電磁石に対して反発力を与えていることから、反跳バネの強さは安全棒の落下性能に影響を与えている。今回の安全棒誤作動に、反跳バネの強さが影響を与えていないのかを調査するため、安全棒上端から反跳バネを取り出し、図 23 に示す測定装置を用いて、反跳バネ単体についてのバネ強さをロードセルで測定した。調査の結果、使用状態（バネ圧縮長さ 51 mm）におけるバネ強さは、安全棒 A が 183.4 N (18.7 kgf)、安全棒 B が 182.4 N (18.6 kgf)、安全棒 C が 175.5 N (17.9 kgf) であり、製作時の値と比較して、経年変化していないことを確認した。また、バネ強さの測定から、若干ではあるが安全棒 A が落ちやすい傾向にあることも確認した。

以上の調査結果により、安全棒 A 誤作動の原因は、安全棒保持力の経年変化によるものではないと判断した。また、安全棒の保持力について、安全棒電磁石単体の吸着力及び反跳バネ強さを測定し、安全棒 A が落ちやすい傾向にあることが判明した。

5.3 その他の発生機構の可能性

今回の安全棒誤作動事象が前回事象とは異なる発生機構（過渡出力運転時の圧力伝播）により発生した可能性も懸念されたことから、過渡出力運転に起因する現象について考察を行った。

過渡出力運転時に安全棒に作用する外力が発生する現象として、図24に示すように、放射線分解ガスボイドの生成・成長に伴い発生した溶液燃料の液塊が安全棒下端に衝突することが考えられた。しかしながら、この要因については、図8に示すように、安全棒が誤作動したと推定される時刻（調整トランジェント棒パルス引抜開始後0.38秒）が放射線分解ガスボイドの生成・成長する時間帯（出力ピーク部、調整トランジェント棒パルス引抜き開始後0.18から0.20秒の間）とずれていることから排除しても差し支えないと判断した。

5.4 安全棒 A で発見された異物の調査

安全棒 A で発見された異物について、異物を特定し、異物の混入時期及び経路を調査するとともに異物の挟み込みによる電磁石吸着力への影響について以下の調査を行った。

5.4.1 異物の混入時期及び経路の調査

(1) 異物の特定

異物の混入時期及び経路の調査に先立って、異物の材質の特定を行った。

ビニール状の小片については、東海研究所物質科学研究部抽出分離科学研究グループに調査を依頼し、試料（異物）と標準物質（原研で使用している酢酸ビニールとポリエチレン）の比較測定する方法で調査した。測定は、試料及び標準物質を49 kN（5 tf）でプレスして表面を平滑にした後、赤外線吸収スペクトル装置（BIO-RAD FTS-135 Dura sample II（ATRダイヤモンドセル）反射法）にて行われた。調査の結果、図25に示すとおり試料とポリエチレンの赤外線吸収スペクトルのピーク位置が一致したことから、異物はポリエチレンであることを確認した。

一方、黒色の小片については、東海研究所ホット試験室ホット試験技術課及び実用燃料試験課に調査を依頼し、表面性状、構成元素を調査した。測定は、試料をそのままの状態、電子顕微鏡及び電子プローブマイクロアナライザー（日本電子製 JXA-8800RL）を用いて行われた。電子プローブマイクロアナライザーによる分析では、代表点の構成元素分析及び代表元素の面分布が行われた。黒色異物の表面は、図26に示すように滑らかではなく、複雑な起伏で構成されていることを確認した。代表点の構成元素分析については、図27に示すように主にNi, Fe, Cr, C, Uが含まれ、CrとNiの割合が18対10程度であること、酸素は微量であること、Moは含まれないことを確認した。代表元素（Fe, U, C）についての面分布を調査したところ、図28に示すようにこれらの元素は均一に分布していることを確認した。

以上の分析結果及びTRACYで使用されている物質から、黒色小片は、オーステナイト系ステンレス鋼（SUS304）の金属片にU, Cの微粒子が付着しているものであることを確認した。

(2) 異物の混入時期及び経路

誤作動を起こした安全棒Aは、今回の施設定期自主検査期間中の平成16年1月7日～8日に分解点検を行っている。安全棒装置の施設定期自主検査の結果を表7に示す。安全棒装置は、炉心タンクから取外し、安全棒部（安全棒本体、ピストン、アーマチュア等）と駆動部（シリンダ、電磁石等）に分解して清掃し、パッキン等の交換、目視点検、組立て及び安全棒落下時間等の性能検査を行っている。表7に示す施設定期自主検査時の点検記録上から異常は認められなかった。

しかしながら、本事象発生後の安全棒分解点検において異物（ポリエチレンシート片及

び金属片)が発見されたことから、異物は平成16年1月における分解時に混入し、分解後の目視点検において見逃されていたか、或いは組立て時に混入したものと考えられる。異物を発見した安全棒シリンダ内部は、鏡面仕上げされており、目視確認が容易ではないことから、定期自主検査において視認されなかったと考えられる。

異物が混入する他の経路として、安全棒上給排気ノズルも考えられるが、電磁石とシリンダとの隙間が約1 mmと狭いことから、配管系統から混入する可能性は考えられないことを確認した。

ポリエチレンシートは、TRACY施設において物品梱包、養生用として一般的に使用されているものであり、安全棒の分解・組立て時に養生用ポリエチレンシートの小片が混入したものと推定した。一方、金属片については、アーマチュア固定ボルトの緩み防止に用いているピン(SUS304)と推定した。同ピンは、安全棒の分解時にアーマチュア固定ボルトを取り外す時にねじ切り、組立て時に余分となった部分を切断する作業があり、その際に発生した微小な破片が安全棒組立て時に混入したものと推定した。

5.4.2 異物の挟み込みによる電磁石吸着力への影響の調査

電磁石とアーマチュアの接触面への異物の挟み込みが電磁石吸着力に及ぼす影響について調査するため、図21に示す電磁石吸着力測定装置を用いて、異物を模擬したスペーサー(ポリエチレンシート又はステンレス鋼)の厚さを変えて電磁石吸着力の低下量を調査した。

調査の結果から、図29に示すとおり今回発見された厚さ約0.2 mmのポリエチレンシート片が接触面に挟み込まれた場合、安全棒保持力が147.1 N (15 kgf)程度低下することが確認された。また、ポリエチレンシート片は容易に折り重なることから、挟み込まれた時の実効的な厚さとしては0.2~0.4 mm程度であったことを確認した。したがって、この異物の挟み込みによって安全棒保持力は、147.1 N (15 kgf) ~ 323.6 N (33 kgf)の範囲で低下していたと考えた。

このポリエチレンシート片の挟み込みに伴う安全棒保持力の低下量(147.1 N (15 kgf) ~ 323.6 N (33 kgf)程度)は、前回主対策として処置した約137.3 N (14 kgf)相当の安全棒保持力強化を十分に上回るものであることを確認した。

以上の調査結果から、電磁石とアーマチュアとの隙間へのポリエチレンシート片の混入により、前回主対策で処置した安全棒保持力の増強を上回る吸着力の低下を招き、安全棒誤作動の支配的な要因となり得ることを確認した。

なお、今回発見された厚さ約 0.05 mm の金属片が挟み込まれた場合は、電磁石吸着力の低下量は 29.4 N (3 kgf) 程度であり、安全棒誤作動には至らないと判断した。

6. まとめ及び対策

調査審議の結果、安全棒Aの誤作動は以下のように推定した。

安全棒Aの電磁石とアーマチュアの隙間に異物が混入したことによる電磁石吸着力の低下により安全棒Aの誤挿入に到った。この異物は、分解・組立てにおいて、養生用として使われていたポリエチレンシートから生じた小片で、その存在に気づかずに組み立てられたものとする。

安全棒Aを真空により炉心タンク上部まで引き抜いた際、電磁石とアーマチュアの接触面にポリエチレンシート片が挟み込まれた状態で安全棒が励磁吸着・保持された。その結果、安全棒Aの安全棒保持力が一時的に147.1 N (15 kgf) ～323.6 N (33 kgf) 程度低下していたと考える。

上記の状態でも過渡出力運転を行った際、炉心タンク気相部で発生した圧力が炉心タンク均圧系配管を經由して安全棒ピストン上部に伝播し、安全棒に外力として作用し、その外力が、ポリエチレンシート片の挟み込みによって低下していた安全棒保持力を上回ったため、安全棒Aの誤作動に至ったと判断した。

安全棒A誤作動の原因となった異物の混入時期及び経路については、施設定期自主検査における安全棒の分解・組立て時に混入したものとする。

したがって、安全棒内への異物混入防止対策として、以下の処置を講じることを提案した。

(1) 異物の発生防止

(物品管理の徹底)

作業者は、安全棒構成部品について、従前の員数・目視点検に加え、各部品に異物となり得る小片が発生する兆候が見られないか、目視点検を入念に行う。

作業者は、各作業において不要となった養生用シート、テープ等消耗品を確実に回収・廃棄する。

(2) 異物の混入防止

(作業環境の管理)

異物が混入する機会を低減させるため、安全棒の分解時（除染を含む。）と組立て時の作業エリアを区分する。組立てエリアにおいては、異物が発生する可能性の高い作業を原則禁止とする。

（作業手順の改善）

作業者は、組立て作業前に、チェックリストにより安全棒部品、工具類等に異物小片が付着していないかを確認する。

シート類を切断する場合、ウエス等で除染する場合、微小金属片を扱う場合等、異物となり得る小片が発生するおそれがある作業の時に、作業者は、小片の発生を監視しつつ注意深く作業を行う。小片が発生した場合は、それを確実に回収・廃棄する。

（組立て時目視点検の強化）

作業者は、安全棒組立て手順の各段階において、組立てられた各部に異物の混入がないことを、内視鏡、手鏡等を併用するなどして入念に確認する。

(3) 対策の徹底

（作業手順書への明記）

上記(1)～(2)の対策を安全棒分解・組立てに係る作業手順書に明記し、作業者等への周知を徹底する。

（異物混入防止意識の喚起）

作業者等の事前教育及び作業打合せを通じて、電磁石吸着面への異物混入が大幅な安全棒保持力低下を引き起こすおそれのあることについて十分認識させ、異物混入防止に対する意識を喚起する。

（他の機器の対策）

今回の原因を踏まえ、分解・組立てを行う他の機器（調整トランジェント棒、溶液燃料排液弁等）については、分解・組立て作業手順書の見直しを行い、異物混入防止に万全を図る。

7. おわりに

今回起こったTRACYの安全棒誤作動は、原子炉の運転に係る安全性に影響を与えるものではなかった。しかしながら、誤作動の原因となった異物は、安全棒のみならず原子炉の運転上支障を及ぼす可能性があることから、より一層適正に管理されることが望まれる。

図表一覧

- 表 1 TRACY施設の概要
- 表 2 TRACY運転時系列（平成16年6月17日）
- 表 3 安全棒誤作動原因調査アドホック委員会の調査審議の経過
- 表 4 安全棒誤作動原因調査等の工程
- 表 5 調整トランジェント棒パルス引抜きによる過渡出力運転データ
- 表 6 調整トランジェント棒パルス引抜き時の衝撃による安全棒ドロップアウト電流
- 表 7 安全棒装置の施設定期自主検査結果
-
- 図 1 TRACY概要説明図
- 図 2 TRACY臨界制御概念図
- 図 3 TRACY安全棒概念図
- 図 4 TRACY安全棒装置断面図
- 図 5 TRACY安全棒配管系統図
- 図 6 R286における出力履歴
- 図 7 前回事象の説明図
- 図 8 R286におけるパルス引抜き直後のイベント（前回事象との比較）
- 図 9 安全棒誤作動に係る要因分析と調査フロー
- 図10 ベント系配管の点検箇所
- 図11 ベント系配管内部の状況
- 図12 鉛直度基準値の測定
- 図13 加速度計の取付け位置
- 図14 調整トランジェント棒引抜き時の衝撃特性
- 図15 安全棒励磁電流回路へのノイズ
- 図16 安全棒Aで発見された異物及び発見時の状況
- 図17 異物の挟み込みにより生じたと思われる痕跡
- 図18 安全棒ドロップアウト電流の経年変化
- 図19 安全棒加圧落下試験装置の概要
- 図20 実際の使用状態における安全棒保持力の余裕
- 図21 安全棒電磁石吸着力の測定装置
- 図22 安全棒電磁石単体の吸着力

- 図23 反跳バネの測定装置
- 図24 過渡出力時の水撃力発生機構
- 図25 異物（ビニール状小片）の分析結果
- 図26 異物（黒色小片）の観察結果
- 図27 異物（黒色小片）の分析結果
- 図28 異物（黒色小片）代表元素の面分布
- 図29 異物の挟み込みによる電磁石吸着力の低下

表1 TRACY施設の概要

最高熱出力	定出力運転時： 10 kW 過渡出力運転時： 5,000 MW
積分出力	最大 32 MJ
過剰反応度	定出力運転時： 0.8 \$ 過渡出力運転時： 3.0 \$
炉心タンク	T50炉心（円環形状） 外 径：約50 cm 内 径：約 8 cm 高 さ：100 cm以下
燃 料	ウラン硝酸水溶液
反 応 度 制御方法	溶液燃料の給排液 調整トランジェント棒の駆動
停止方法	安全棒及び調整トランジェント棒の落下 溶液燃料の排液

表2 TRACY 運転時系列 (平成 16 年 6 月 17 日)

時刻	時系列
13:51	TRACY 起動 (「定出力運転」モードの選択)
13:56	安全棒 (A、B、C) 引抜き
14:04	調整トランジェント棒引抜き
14:13	排液弁閉
14:13	給液開始
15:12	臨界 (臨界液位 522.50 mm、出力 1 W)
15:14	調整トランジェント棒挿入
15:17	給液開始
15:52	臨界 (臨界液位 645.55 mm、出力 1 W)
15:56	過渡出力運転「パルス引抜き」モード選択
16:10	調整トランジェント棒パルス引抜き
16:10	安全棒 A 誤挿入
16:10	排液弁閉 (溶液燃料がダンプ槽へ排液される。) 調整トランジェント棒挿入 (排液弁閉及び調整トランジェント棒挿入は、安全棒 A 誤挿入により、起動インターロックが作動したことによる動作である。)
16:18	「定出力運転」モードの選択
16:19	安全棒 B、C を手動挿入
16:19	TRACY 停止 (「点検」モード選択)
16:20	運転終了 (「停止」モード選択)

表3 安全棒誤作動原因調査アドホック委員会の調査審議の経過 (1/2)

年月日	調査審議の主な内容
第1回アドホック委員会 (平成16年6月23日開催)	○発生事象及びこれまでの調査状況に関する報告を踏まえ、今後の調査方針について審議
第2回アドホック委員会 (平成16年6月24日午前開催)	○現地調査を実施
第3回アドホック委員会 (平成16年6月24日午後開催)	○構造等に関する質疑 ○安全棒取外し前の調査事項について審議し、調整トランジェント棒引抜き時の衝撃による加速度及び振動特性の測定を要請 ○電磁石回路、反跳バネの調査及び安全棒落下タイミングの分析を要請
第4回アドホック委員会 (平成16年6月30日開催)	○調整トランジェント棒引抜き時の衝撃は安全棒誤作動の支配的要因でないことを確認 ○安全棒Aの保持力は5年前の性能と変わりないことを確認
第5回アドホック委員会 (平成16年7月1日開催)	○ベント系配管内部の状況の確認を要請
第6回アドホック委員会 (平成16年7月2日開催)	○安全棒の分解点検を行い、電磁石単体吸着性能の測定、電磁石吸着面の異物混入の調査、反跳バネの測定を要請

表3 安全棒誤作動原因調査アドホック委員会の調査審議の経過 (2/2)

年月日	調査審議の主な内容
第7回アドホック委員会 (平成16年7月7日開催)	<ul style="list-style-type: none"> ○炉心タンク周りの漏電について調査を要請 ○要因分析ツリーを基に、調査方針を再検討
第8回アドホック委員会 (平成16年7月9日開催)	<ul style="list-style-type: none"> ○安全棒Aで発見された異物及び異物が挟み込まれた場合の影響について審議 ○混入経路及び混入時期を絞り込むため、異物を特定するための調査を要請
第9回アドホック委員会 (平成16年7月15日開催)	<ul style="list-style-type: none"> ○異物の挟み込みによる保持力低下について審議され、安全棒誤作動の支配的要因と結論 ○異物混入防止対策について審議
第10回アドホック委員会 (平成16年7月22日開催)	<ul style="list-style-type: none"> ○これまでの調査結果について審議 ○原因調査について取り残しがないことを確認
第11回アドホック委員会 (平成16年7月28日開催)	<ul style="list-style-type: none"> ○大臣報告書案について審議 ○安全棒装置分解・組立て手順書について審議

表4 安全棒誤作動原因調査等の工程 (1/2)

	6月							7月																								
	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	
月日	火	水	木	金	土	日	月	火	水	木	金	土	日	月	火	水	木	金	土	日	月	火	水	木	金	土	日	月	火	水	木	
安全棒A誤作動発生																																
大臣報告																																
アドホック委員会開催																																
投入反応度等の調査																																
電磁石の抵抗及び絶縁抵抗測定																																
点検																																
ノイズによる励磁電流低下調査																																
安全棒据け状態確認																																
調整トランジェント棒引抜時の振動における影響調査																																
励磁電流確認																																
ドロップアウト電流測定																																
安全棒装置系統の弁状態確認																																
安全棒装置、調整トランジェント棒装置据付状態確認																																
調整トランジェント棒引抜時における安全棒落下励磁電流測定																																
調整トランジェント棒引抜時の安全棒加速度測定																																
安全棒加圧落下試験(準備作業を含む)																																
炉心タンクイベント系配管内部点検(炉心タンク出口配管部、圧力計取付配管部)																																
安全棒分解点検(準備作業を含む)																																
(内部点検、電磁石吸着力、反跳ハネ強さ等測定)																																
電磁石回路の漏電の調査																																
炉心タンクイベント系配管内部点検(炉心タンク出口配管溶接材料の液塊の安全棒への衝突)																																

表5 調整トランジェント棒パルス引抜きによる過渡出力運転データ

運転日	溶液燃料データ				定出力運転データ				過渡出力運転データ				出力	
	ウラン濃度 (gU/l)	硝酸濃度 (mol/l)	密度 (g/cm ³)	臨界液位 (mm)		トランジェント棒挿入時	トランジェント棒直前の液位 (mm)	トランジェント棒反応度値 (\$)	初期出力 (W)	添加反応度 (\$)	最大出力 (GW)	積算出力 (MW・s)		
				トランジェント棒引抜時	トランジェント棒挿入時									
H11.07.12	373.7	0.67	1.52109	536.82 (26.0°C)	672.42 (26.0°C)	3.09	672.42 (26.0°C)	1	3.00	1.7	21.2			
H11.07.21	373.3	0.67	1.52195	535.71 (26.0°C)	670.36 (26.0°C)	3.09	670.36 (26.0°C)	1	3.00	1.7	21.2			
H11.11.08	375.0	0.67	1.52239	531.40 (25.5°C)	660.57 (25.4°C)	2.96	660.57 (25.4°C)	1	2.96	1.7	20.6			
H11.11.15	375.5	0.67	1.52306	531.16 (24.8°C)	660.42 (24.9°C)	2.96	660.42 (24.9°C)	1	2.96	1.7	21.0			
H11.12.03	376.2	0.65	1.52318	528.29 (24.6°C)	656.28 (24.6°C)	2.98	656.28 (24.6°C)	1	2.98	1.7	20.5			
H12.05.17	378.4	0.62	1.52532	524.75 (26.5°C)	649.74 (26.5°C)	2.97	649.74 (26.5°C)	1	2.97	1.6	22.3			
H13.06.21	384.9	0.54	1.53348	509.22 (25.8°C)	621.47 (25.8°C)	2.93	621.47 (25.8°C)	1	2.93	1.5	22.3			
H13.06.26	384.9	0.54	1.53348	508.06 (25.7°C)	619.44 (25.8°C)	2.93	619.36 (25.8°C)	1	2.93	1.5	21.7			
H13.07.12	385.6	0.51	1.53422	507.92 (26.4°C)	619.16 (26.4°C)	2.93	619.16 (26.4°C)	1	2.93	1.5	19.0			
H13.11.06	388.2	0.58	1.53693	509.62 (25.7°C)	623.76 (25.7°C)	2.97	623.76 (25.7°C)	1	2.97	1.5	21.9			
H14.06.11	395.5	0.57	1.54909	490.34 (25.6°C)	588.77 (25.6°C)	2.89	588.77 (25.6°C)	1	2.89	1.4	18.8			
H14.06.18	395.3	0.59	1.54931	489.83 (25.6°C)	587.78 (25.6°C)	2.88	587.77 (25.6°C)	1	2.88	1.4	18.7			
H14.07.02	396.0	0.60	1.54947	488.95 (25.4°C)	586.46 (25.4°C)	2.89	586.46 (25.4°C)	1	2.89	1.4	18.9			
H14.07.17	395.9	0.63	1.54989	488.74 (25.4°C)	586.17 (25.5°C)	2.89	586.17 (25.5°C)	1	2.89	1.4	17.6			
H14.08.20	397.2	0.62	1.55292	484.27 (25.1°C)	578.70 (25.1°C)	2.88	578.70 (25.1°C)	1	2.88	1.4	21.2			
H14.10.22	402.7	0.61	1.55737	472.46 (25.3°C)	558.54 (25.3°C)	2.83	558.54 (25.3°C)	1	2.83	1.3	21.1			
H15.06.24	400.5	0.58	1.55421	481.81 (23.7°C)	574.44 (23.8°C)	2.87	574.44 (23.8°C)	1	2.87	1.4	17.0			
H15.07.09	400.0	0.58	1.55408	481.56 (24.9°C)	574.04 (24.9°C)	2.87	574.04 (24.9°C)	1	2.87	1.4	17.0			
H16.06.17	379.3	0.54	1.52385	522.50 (26.4°C)	645.55 (26.5°C)	2.97	645.55 (26.5°C)	1	2.97	1.6	19.6			

安全棒落下事象が発生した運転を示す。

表 6 調整トランジェント棒パルス引抜き時の衝撃による安全棒ドロップアップウトロ電流

試験番号	安全棒A			安全棒B			安全棒C		
	励磁電流 (A)	電圧 (V)	安全棒 状態	励磁電流 (A)	電圧 (V)	安全棒 状態	励磁電流 (A)	電圧 (V)	安全棒 状態
1	2.60	5.27	保持	2.60	5.17	保持	2.60	5.60	保持
2	2.40	4.87	↓	2.40	4.78	↓	2.40	5.10	↓
3	2.30	4.66	↓	2.30	4.58	↓	2.30	5.00	↓
4	2.25	4.57	↓	2.25	4.48	↓	2.25	4.90	↓
5	2.20	4.47	↓	2.20	4.38	↓	2.20	4.80	↓
6	2.15	4.37	↓	2.15	4.28	↓	2.15	4.50	↓
7	2.10	4.26	落下	2.10	4.19	↓	2.10	4.30	↓
8	3.00	6.11	保持	2.00	3.97	保持	2.00	4.30	保持
9	↓	↓	↓	1.95	3.87	↓	1.95	4.20	↓
10	↓	↓	↓	1.90	3.76	↓	1.90	4.10	↓
11	↓	↓	↓	1.85	3.66	↓	1.85	4.10	↓
12	↓	↓	↓	1.80	3.56	↓	1.80	3.90	落下
13	3.00	6.26	保持	1.80	3.58	保持	3.00	6.30	保持
14	↓	↓	↓	1.75	3.47	落下	↓	↓	↓

表7 安全棒装置の施設定期自主検査結果

点検 平成16年1月6日～平成16年3月17日

点検項目	点検内容																																				
<p>分解・点検・清掃組立 作業</p>	<p>安全棒駆動装置を各部品に分解し、それぞれの部品について、異常の有無を点検及び清掃し、再組立。消耗品及び交換部品で、交換の必要な物については交換。</p> <p>交換部品(安全棒A～C共通)</p> <table border="0"> <tr> <td>蓋板</td> <td>バックアップ用リング</td> </tr> <tr> <td></td> <td>○リング</td> </tr> <tr> <td>ロッドカバー</td> <td>バックアップ用リング</td> </tr> <tr> <td></td> <td>○リング</td> </tr> <tr> <td>衝撃用パッキン受け アマチュア</td> <td>安全棒用パッキン</td> </tr> <tr> <td>ピストン</td> <td>ピストンパッキン</td> </tr> </table>	蓋板	バックアップ用リング		○リング	ロッドカバー	バックアップ用リング		○リング	衝撃用パッキン受け アマチュア	安全棒用パッキン	ピストン	ピストンパッキン																								
蓋板	バックアップ用リング																																				
	○リング																																				
ロッドカバー	バックアップ用リング																																				
	○リング																																				
衝撃用パッキン受け アマチュア	安全棒用パッキン																																				
ピストン	ピストンパッキン																																				
<p>メンテナンスボックスでの 作動確認</p>	<p>安全棒駆動装置をメンテナンスボックスに据付け、引抜、励磁、落下について、正常に作動することを確認</p> <p>安全棒落下時間</p> <table border="0"> <tr> <td>安全棒 A</td> <td>0.98 秒</td> </tr> <tr> <td>安全棒 B</td> <td>1.00 秒</td> </tr> <tr> <td>安全棒 C</td> <td>1.00 秒</td> </tr> </table>	安全棒 A	0.98 秒	安全棒 B	1.00 秒	安全棒 C	1.00 秒																														
安全棒 A	0.98 秒																																				
安全棒 B	1.00 秒																																				
安全棒 C	1.00 秒																																				
<p>炉心タンク据付後の 性能検査</p>	<p>安全棒駆動装置を炉心タンクに据付け、落下時間及び電磁石ドロップアウト電流値の測定</p> <p>安全棒落下時間</p> <table border="0"> <tr> <td>液位</td> <td>0cm</td> <td>40cm</td> <td>60cm</td> <td>80cm</td> <td>100cm</td> </tr> <tr> <td>安全棒 A</td> <td>0.92 秒</td> <td>0.92 秒</td> <td>0.93 秒</td> <td>0.93 秒</td> <td>0.93 秒</td> </tr> <tr> <td>安全棒 B</td> <td>1.04 秒</td> <td>0.99 秒</td> <td>1.00 秒</td> <td>0.99 秒</td> <td>0.99 秒</td> </tr> <tr> <td>安全棒 C</td> <td>0.97 秒</td> <td>0.98 秒</td> <td>0.99 秒</td> <td>0.98 秒</td> <td>0.98 秒</td> </tr> </table> <p>励磁電流</p> <table border="0"> <tr> <td>安全棒 A</td> <td>3.01A</td> </tr> <tr> <td>安全棒 B</td> <td>3.01A</td> </tr> <tr> <td>安全棒 C</td> <td>3.00A</td> </tr> </table> <p>ドロップアウト電流値</p> <table border="0"> <tr> <td>安全棒 A</td> <td>1.79A</td> </tr> <tr> <td>安全棒 B</td> <td>1.56A</td> </tr> <tr> <td>安全棒 C</td> <td>1.50A</td> </tr> </table>	液位	0cm	40cm	60cm	80cm	100cm	安全棒 A	0.92 秒	0.92 秒	0.93 秒	0.93 秒	0.93 秒	安全棒 B	1.04 秒	0.99 秒	1.00 秒	0.99 秒	0.99 秒	安全棒 C	0.97 秒	0.98 秒	0.99 秒	0.98 秒	0.98 秒	安全棒 A	3.01A	安全棒 B	3.01A	安全棒 C	3.00A	安全棒 A	1.79A	安全棒 B	1.56A	安全棒 C	1.50A
液位	0cm	40cm	60cm	80cm	100cm																																
安全棒 A	0.92 秒	0.92 秒	0.93 秒	0.93 秒	0.93 秒																																
安全棒 B	1.04 秒	0.99 秒	1.00 秒	0.99 秒	0.99 秒																																
安全棒 C	0.97 秒	0.98 秒	0.99 秒	0.98 秒	0.98 秒																																
安全棒 A	3.01A																																				
安全棒 B	3.01A																																				
安全棒 C	3.00A																																				
安全棒 A	1.79A																																				
安全棒 B	1.56A																																				
安全棒 C	1.50A																																				

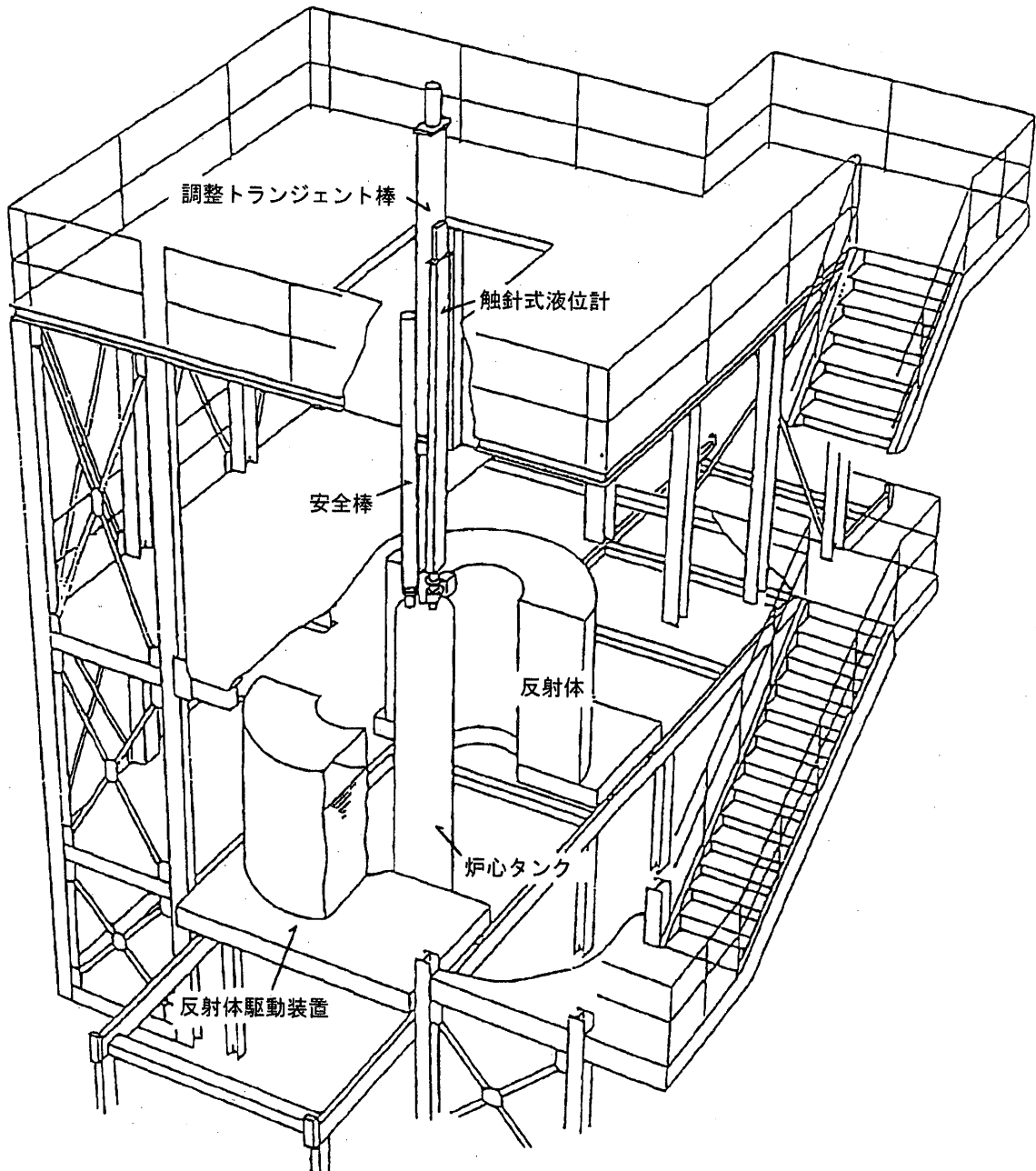


図1 TRACY概要説明図

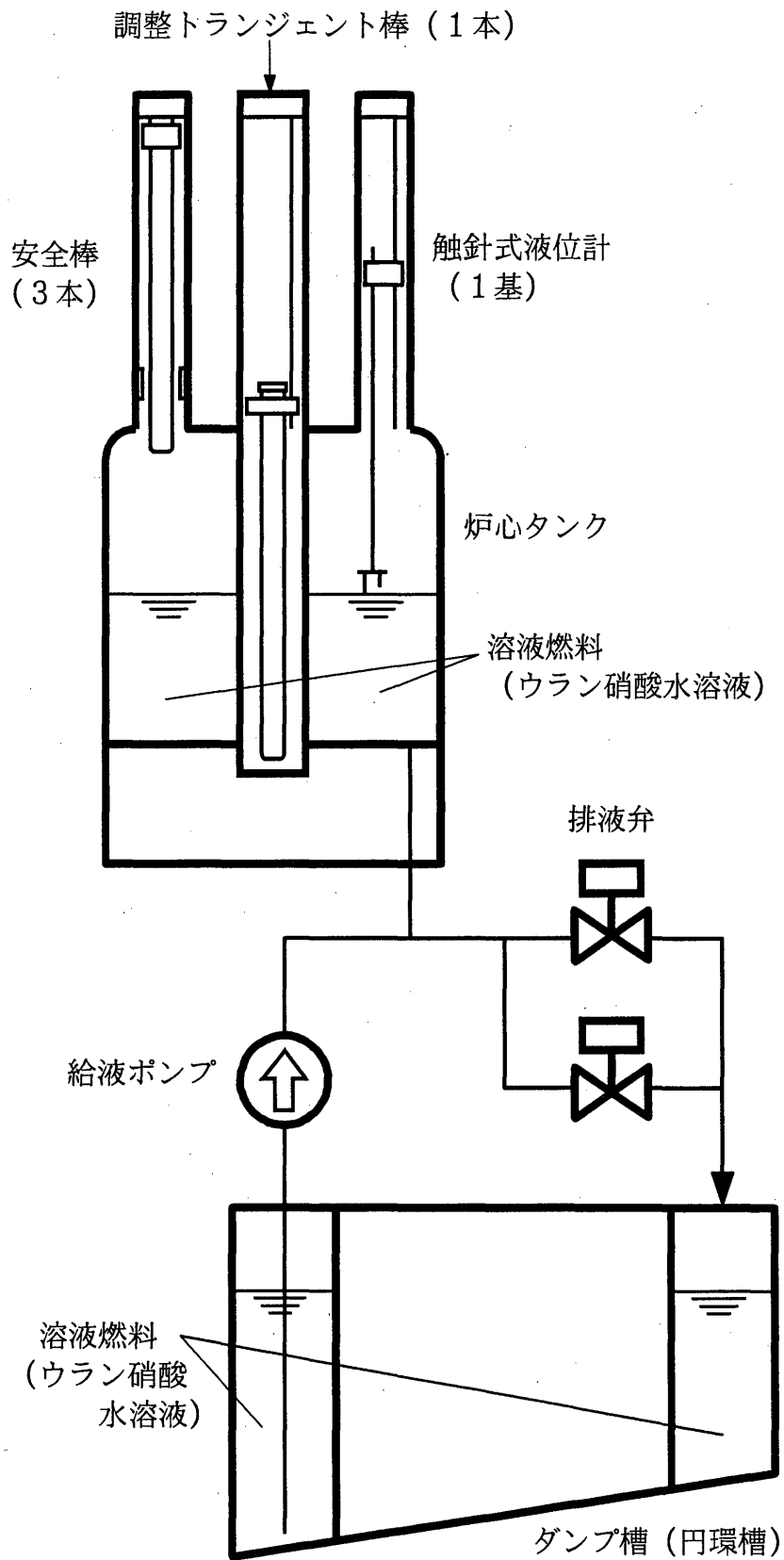


図2 TRACY臨界制御概念図

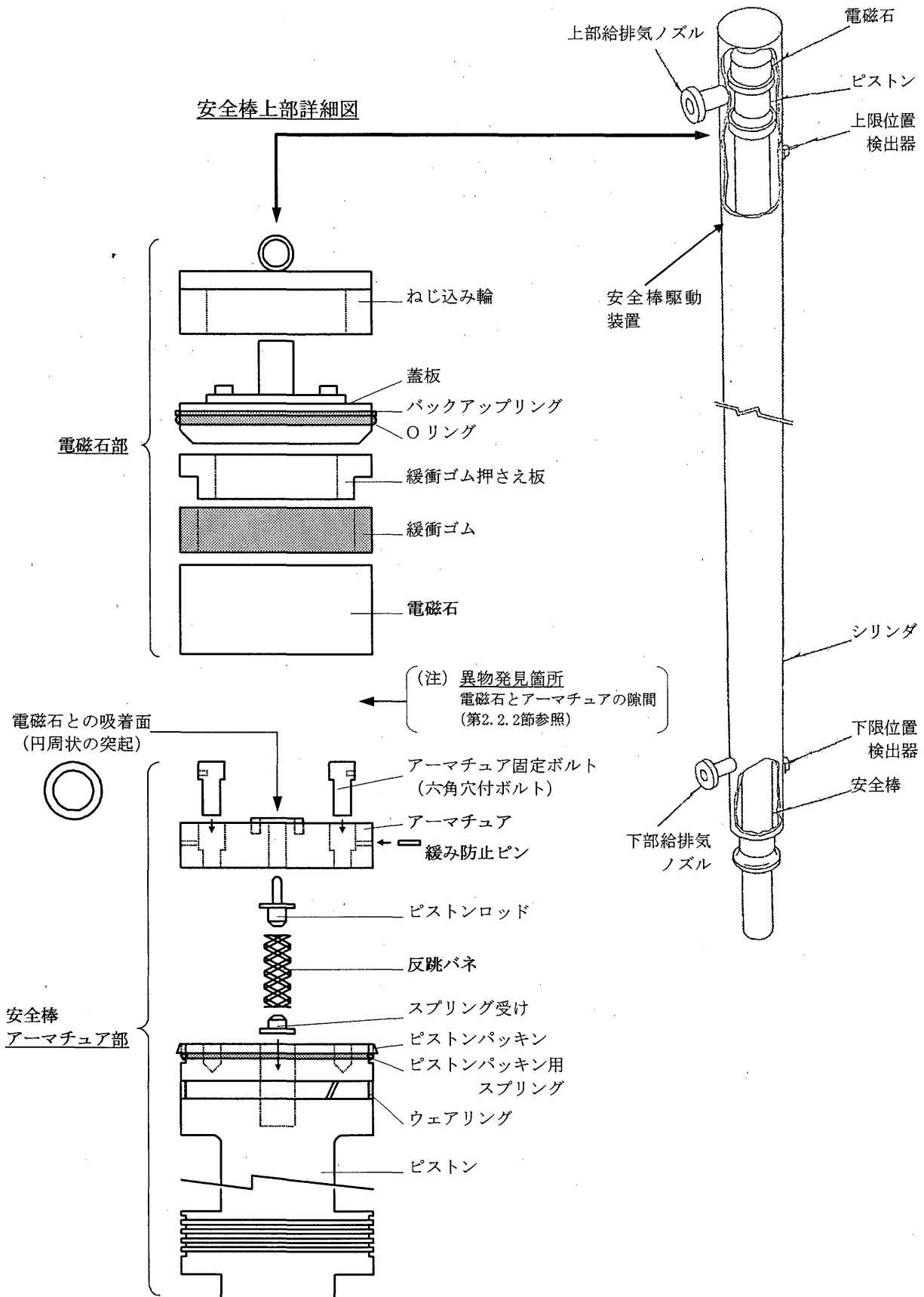


図3 TRACY安全棒概念図

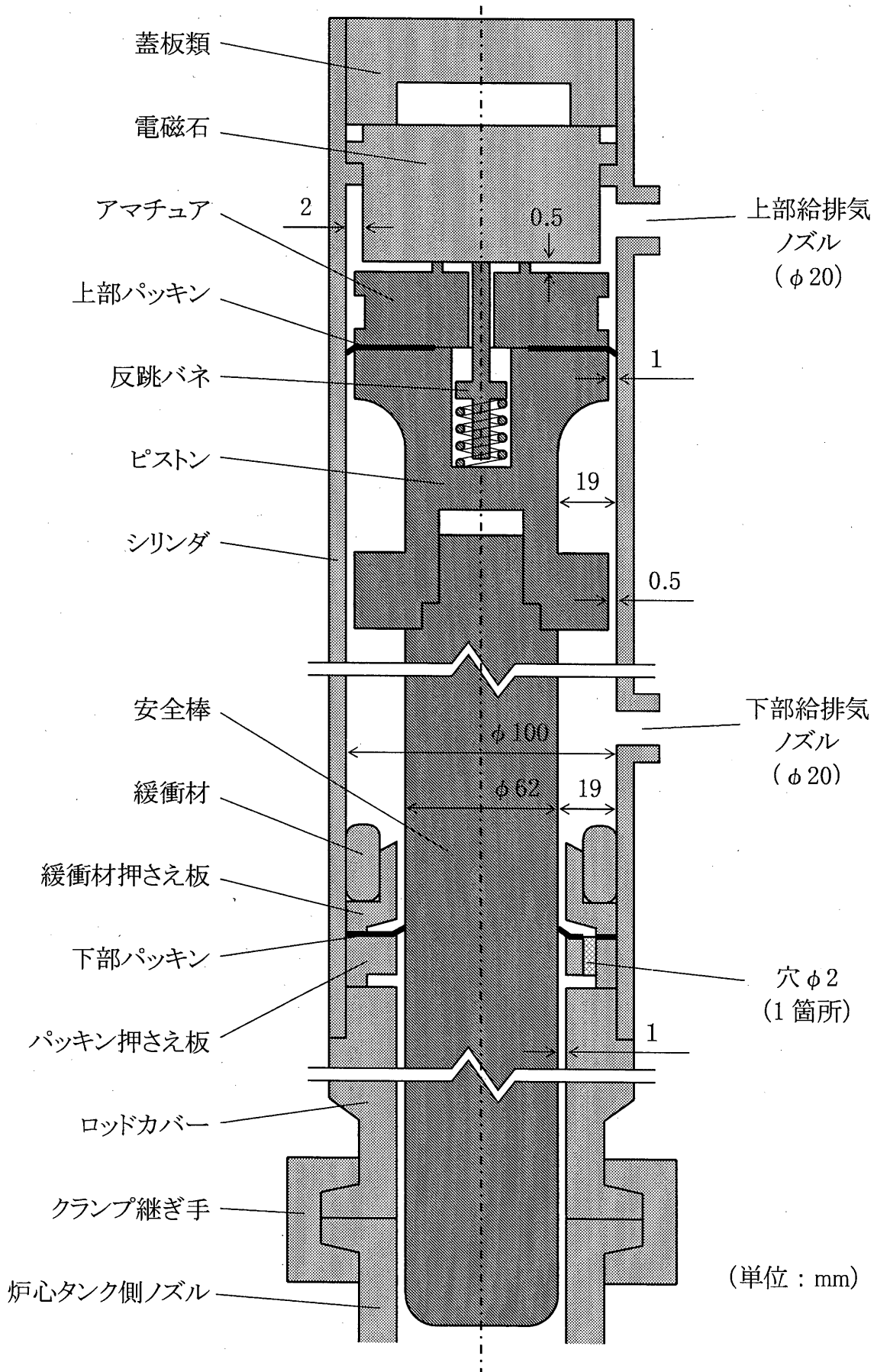


図4 TRACY安全棒装置断面図

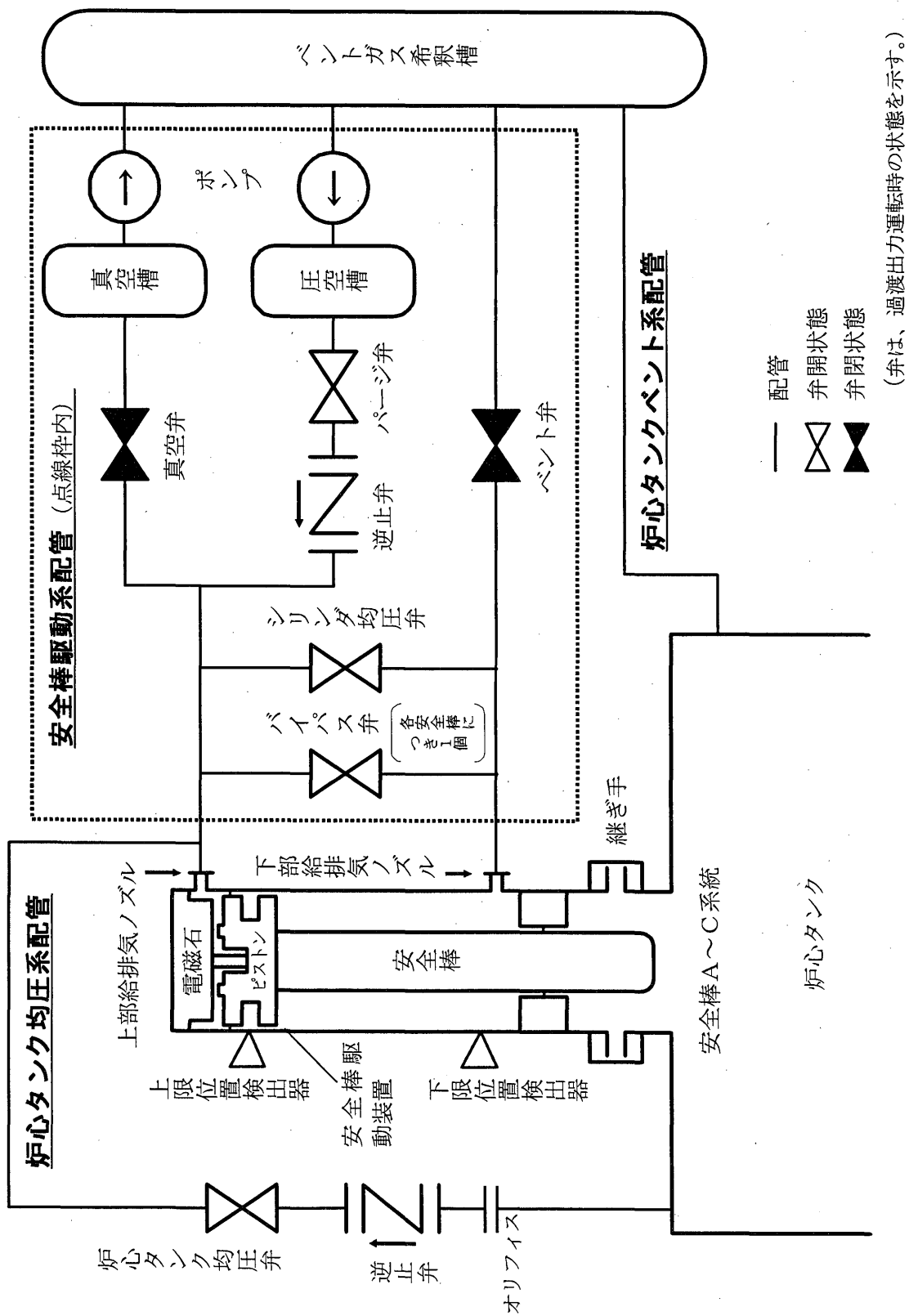


図5 TRACY安全棒配管系統図

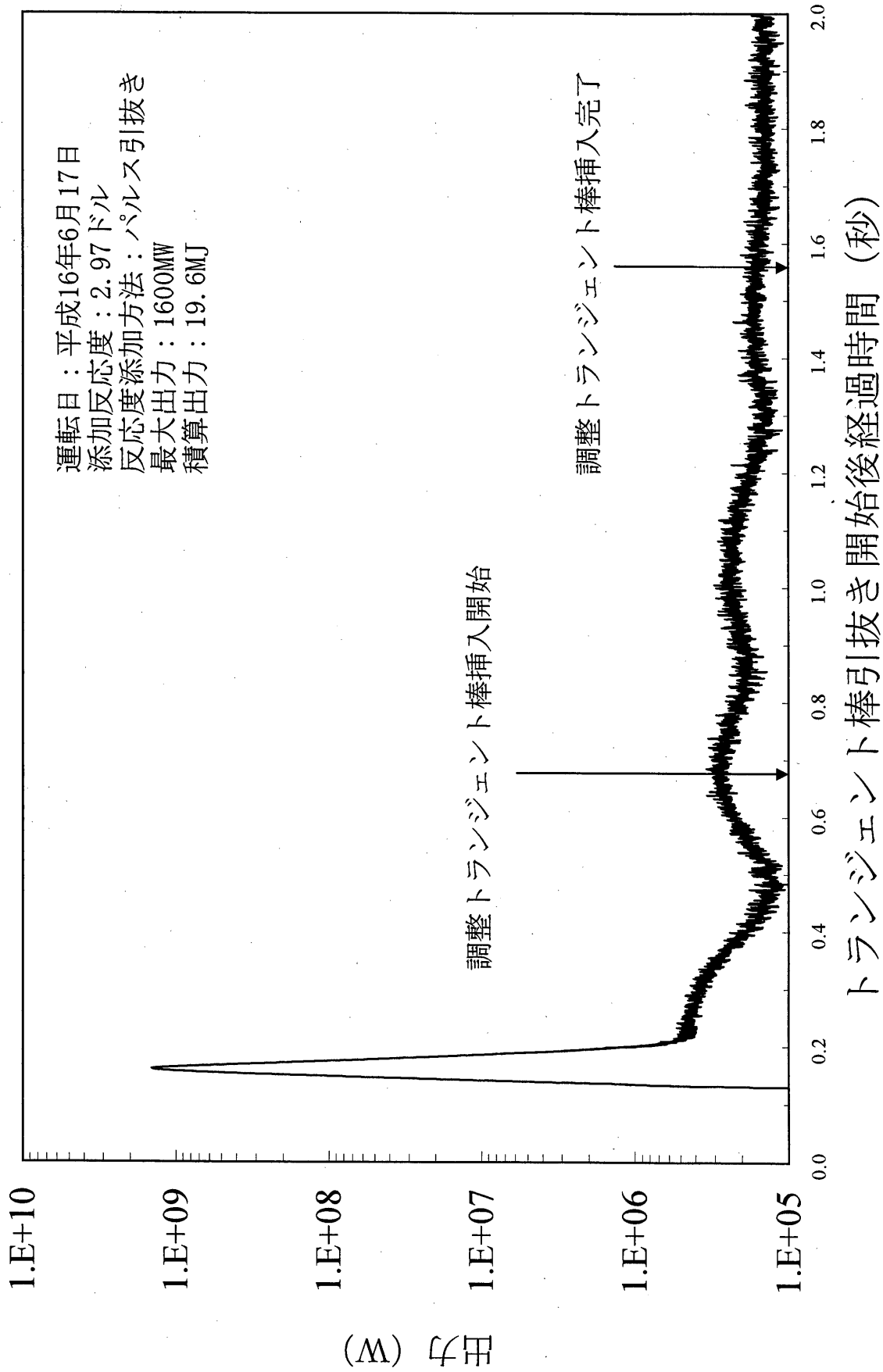
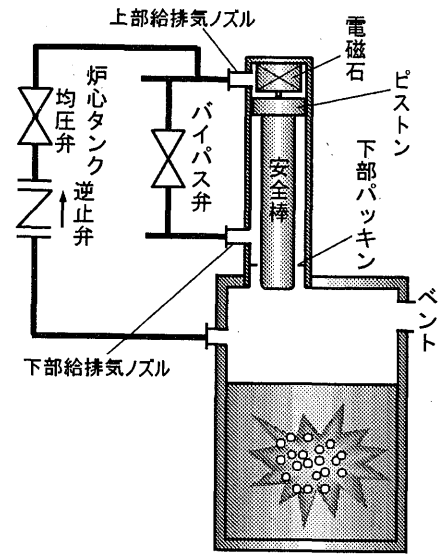
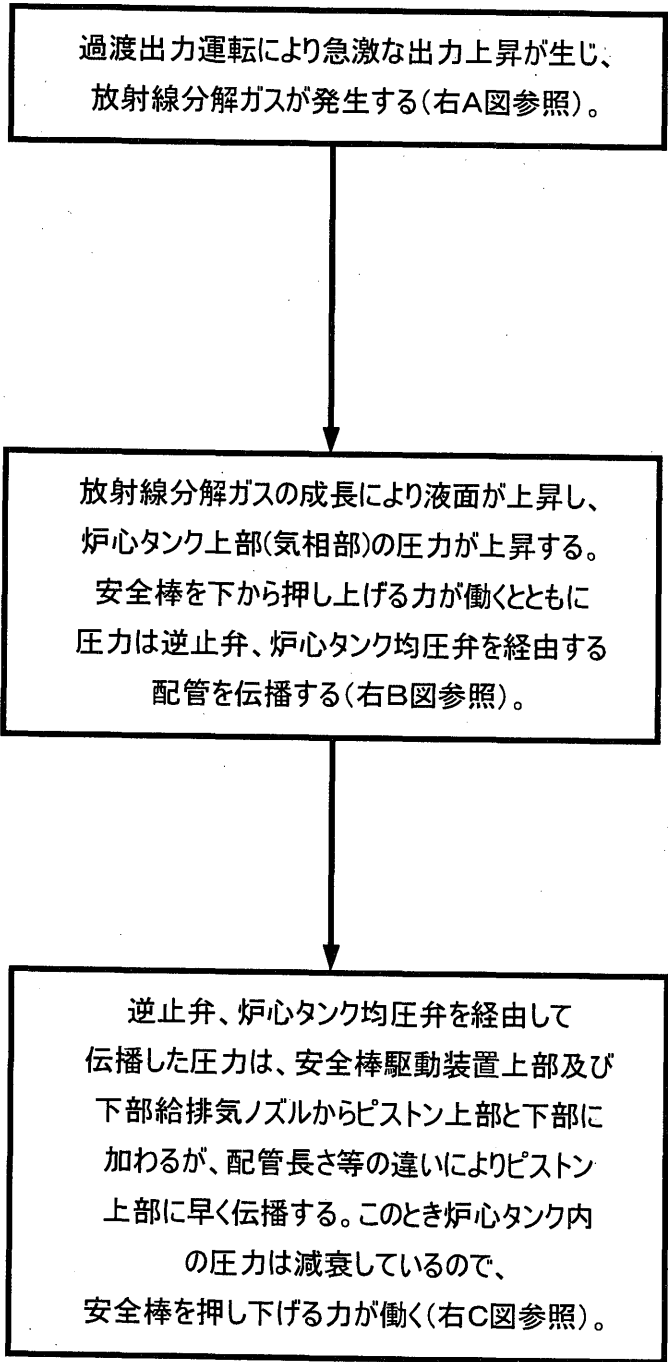
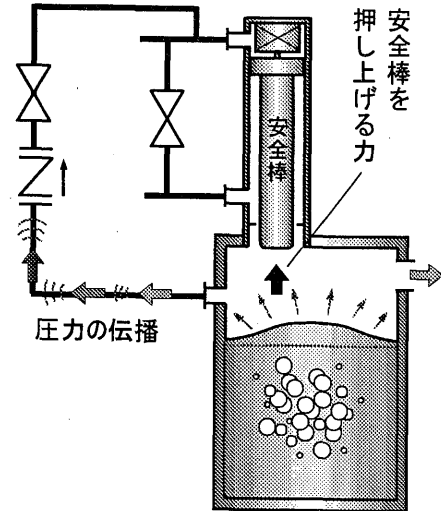


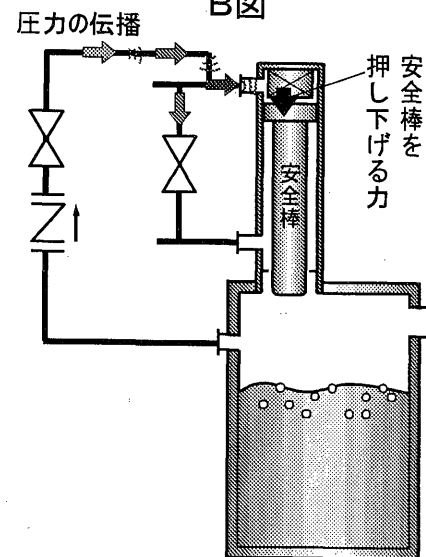
図6 R286における出力履歴



A図

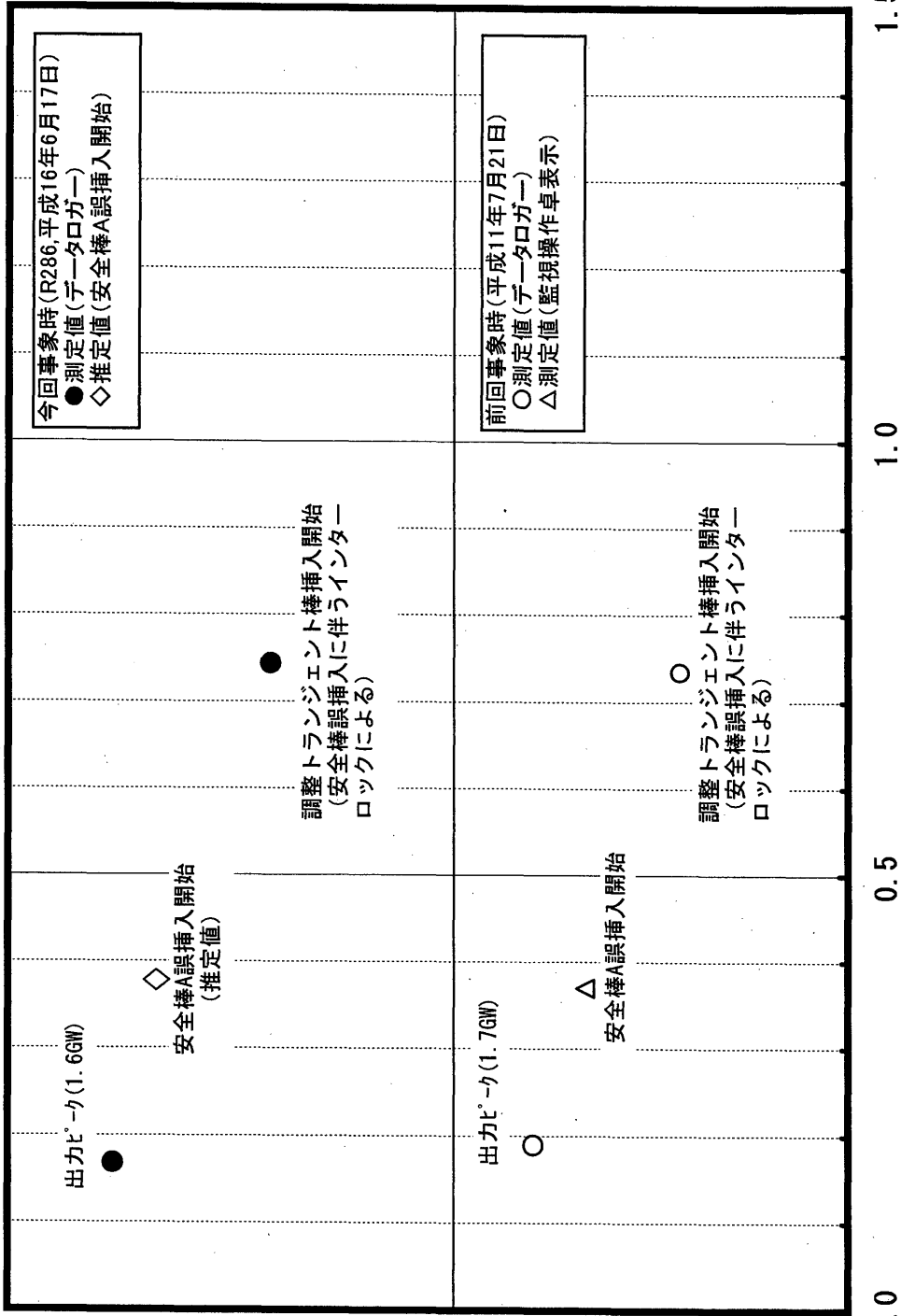


B図



C図

図7 前回事象の説明図



調整トランジェント棒引抜き開始後時間 (秒)

図8 R286におけるパルス引抜き直後のイベント (前回事象との比較)

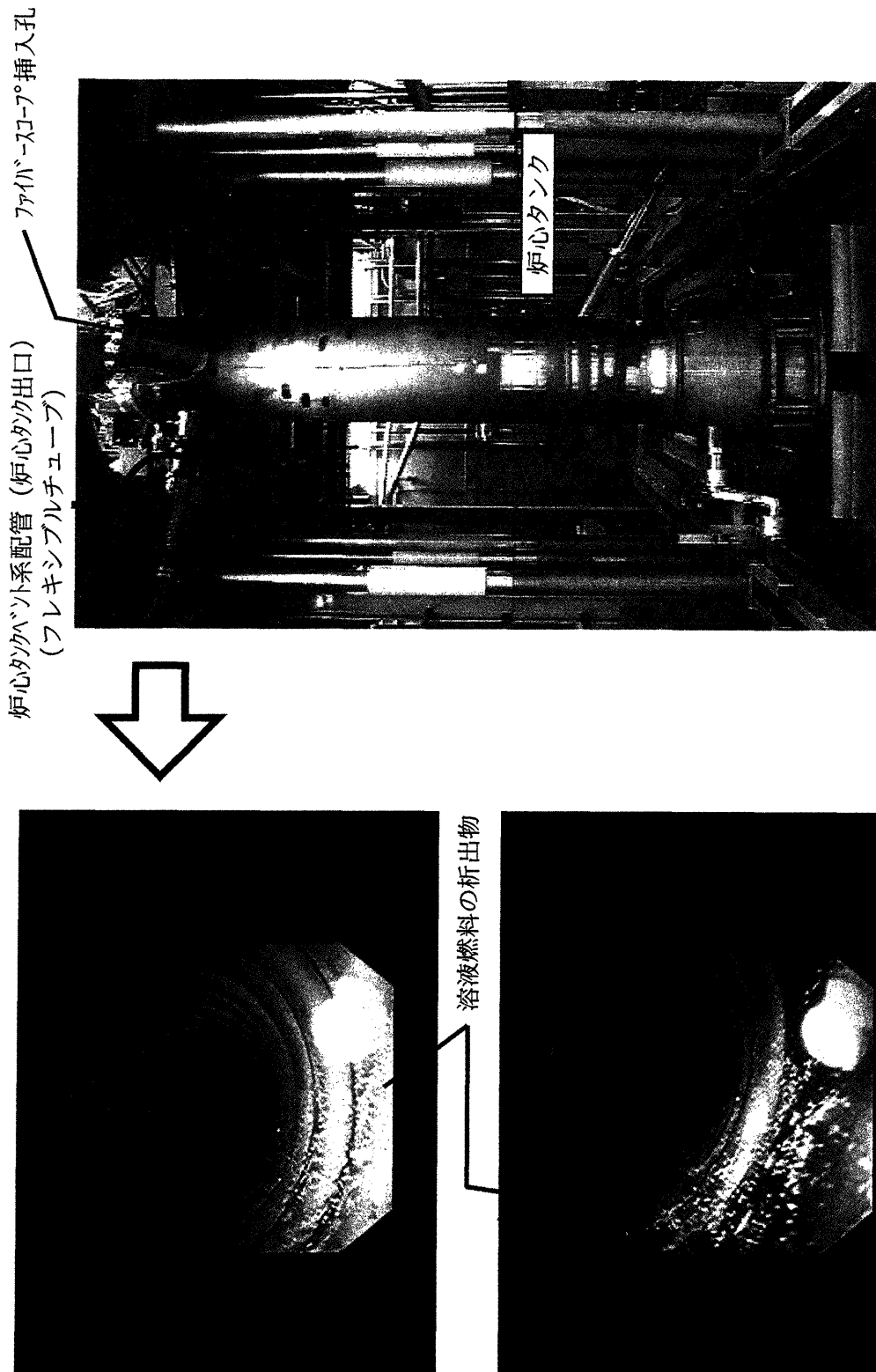


図11 ベント系配管内部の状況

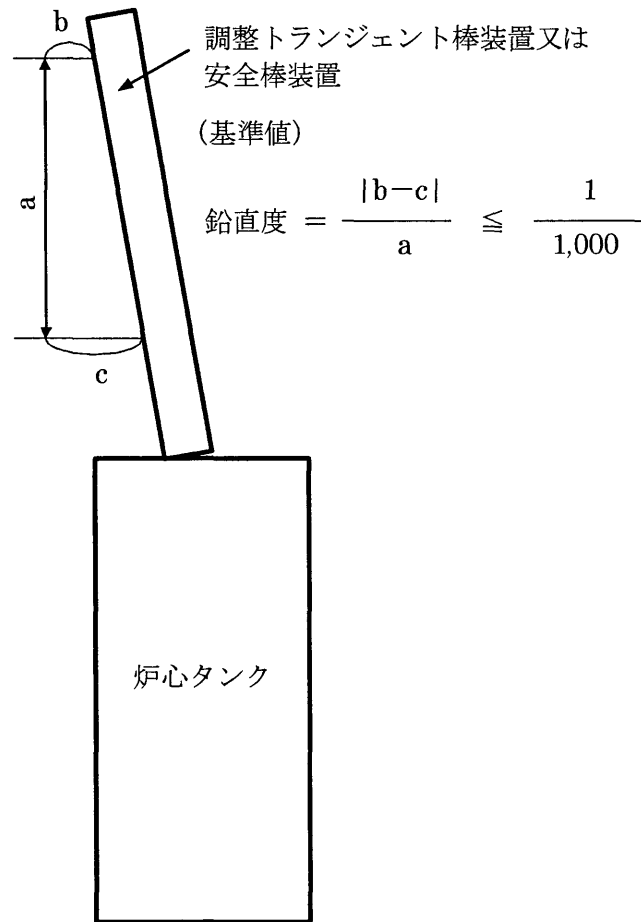


図 12 鉛直度基準値の測定

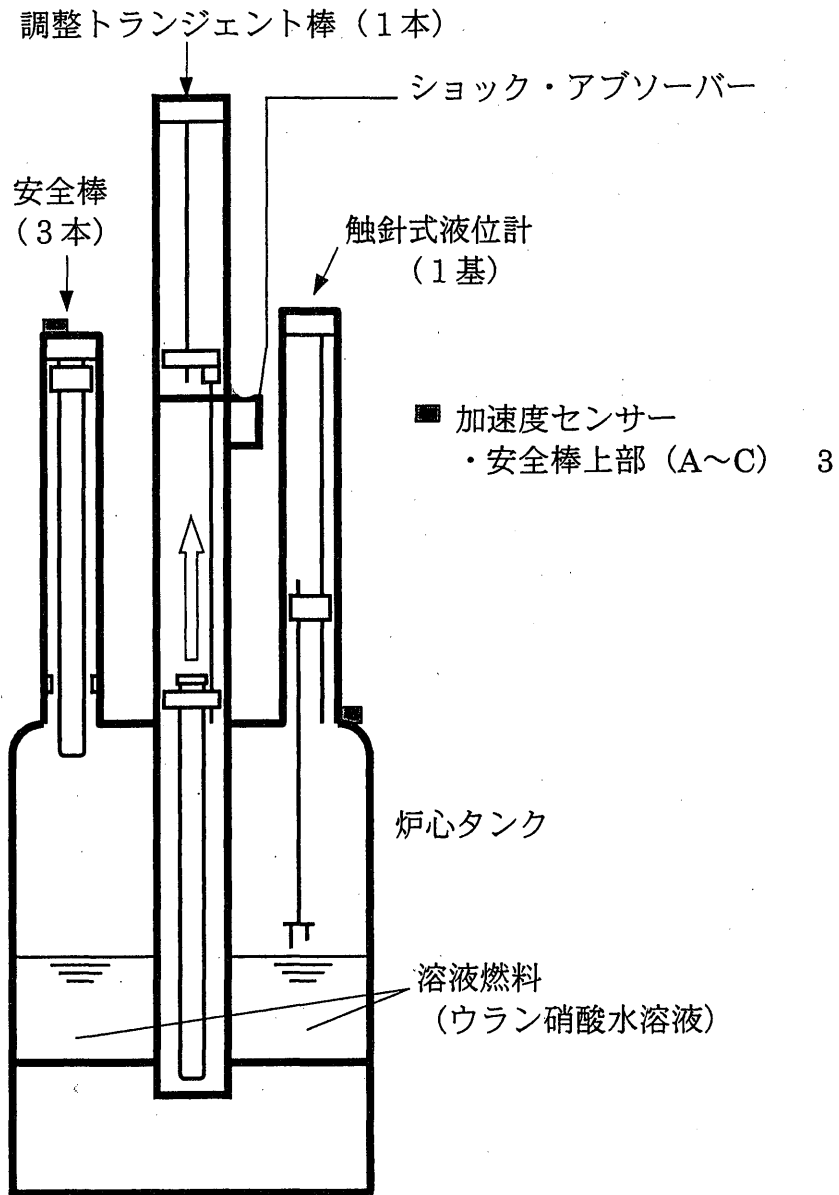


図13 加速度計の取付け位置

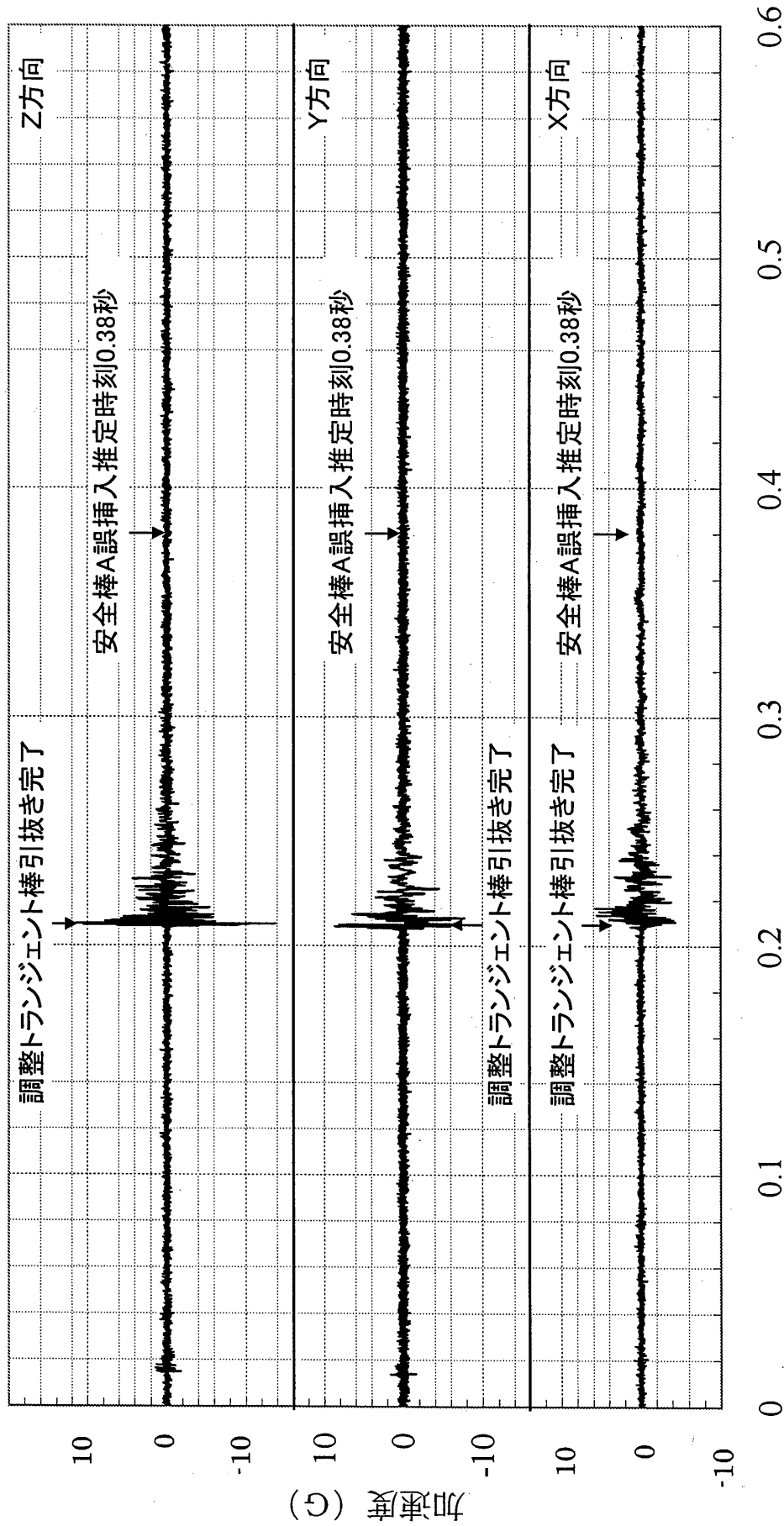
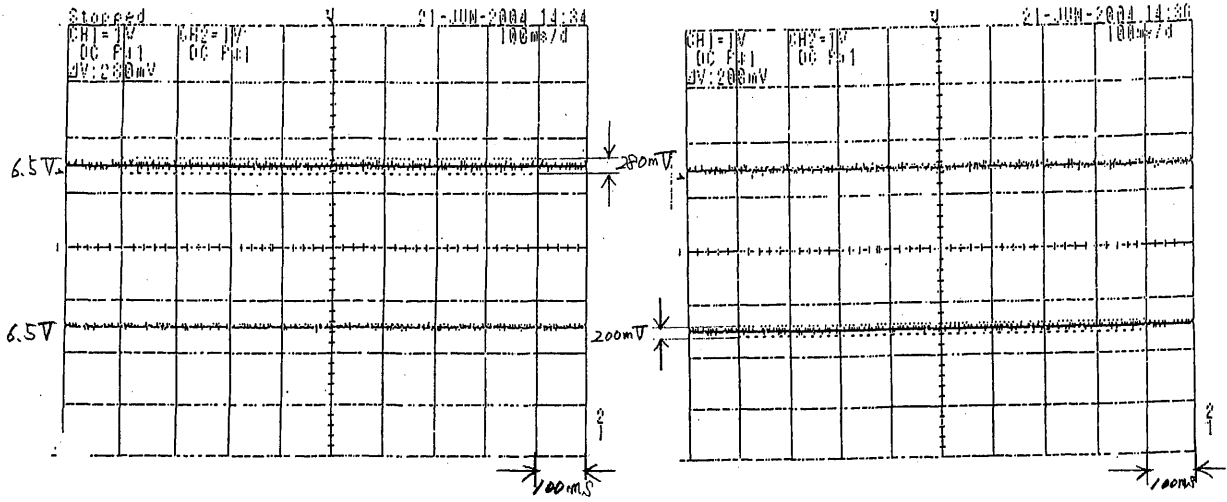


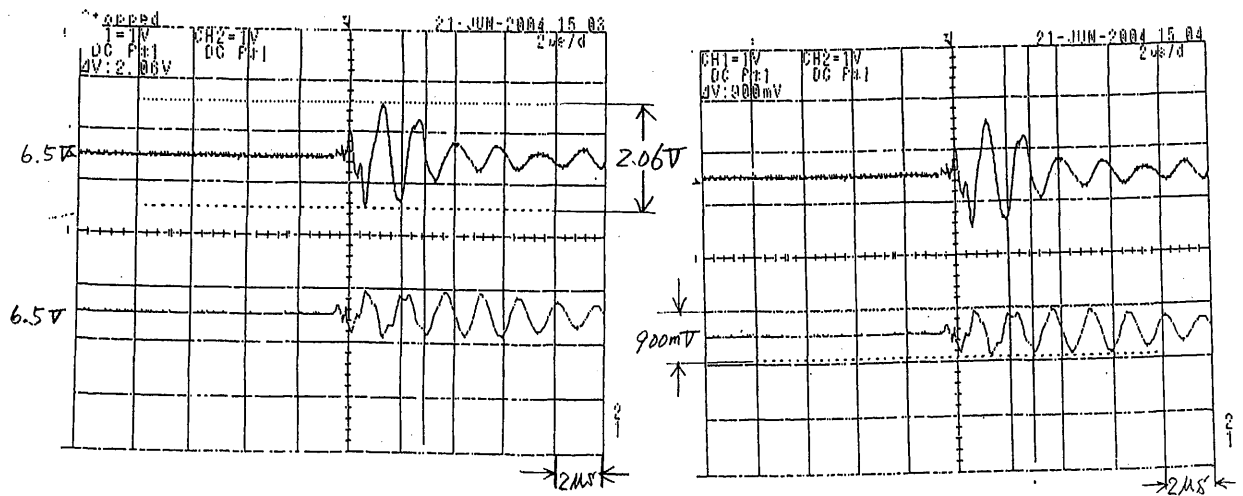
図14 調整トランジェント棒引抜き時の衝撃特性 (安全棒A)



通常状態*1 (安全棒A読み値)

通常状態 (安全棒B読み値)

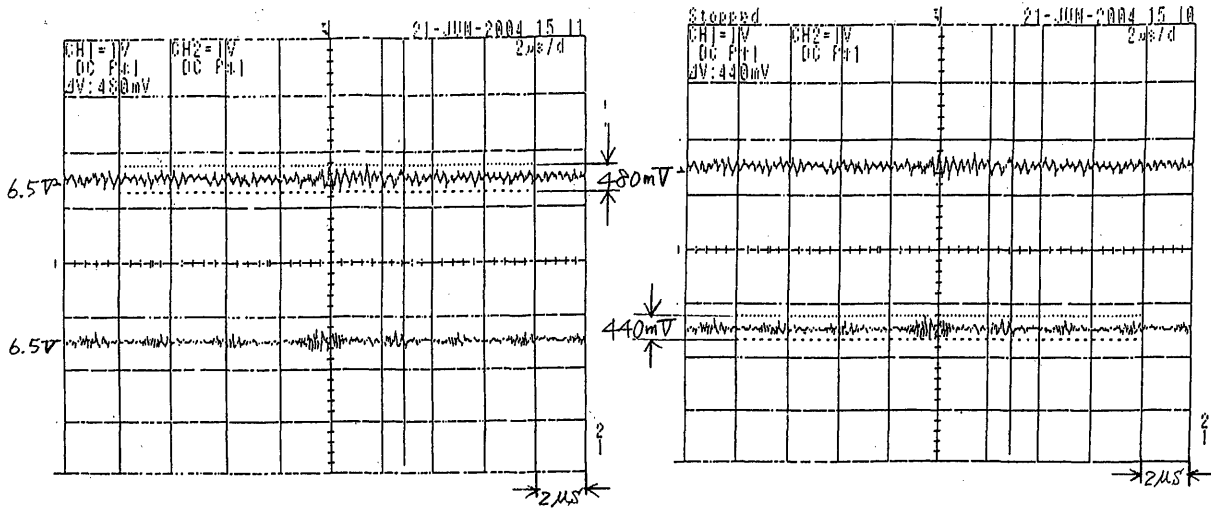
*1: 通常状態とは、安全棒励磁、Tr棒停止、ブロワ起動中、水素ガスサンプリングポンプ運転中の状態を指す。



通常状態+再結合器ヒーターON
(安全棒A読み値)

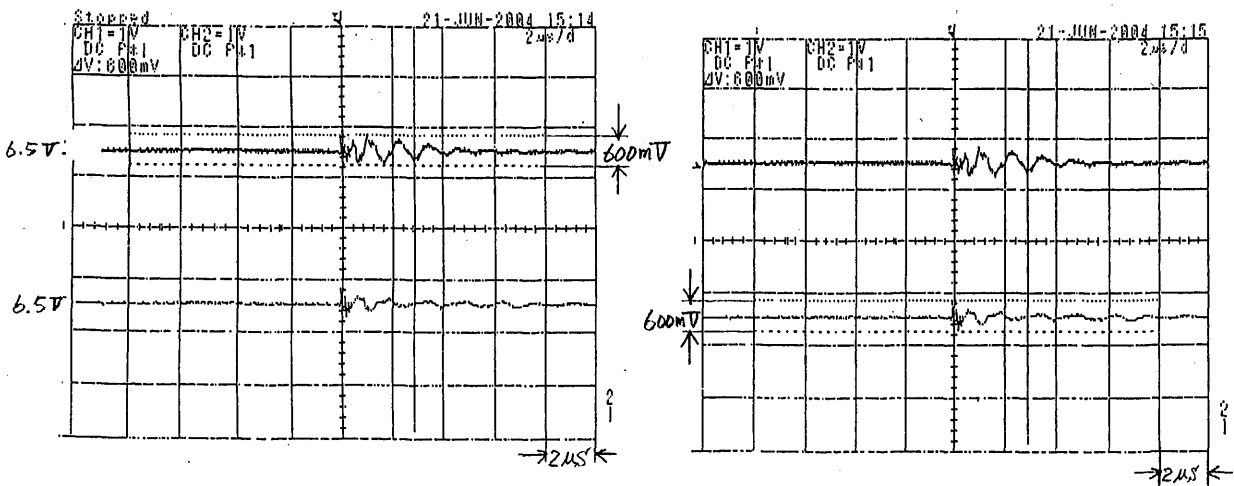
通常状態+再結合器ヒーターON
(安全棒A読み値)

図15 安全棒励磁電流回路へのノイズ (1/4)



通常状態+第1よう素吸着塔ヒーターON
(安全棒A読み値)

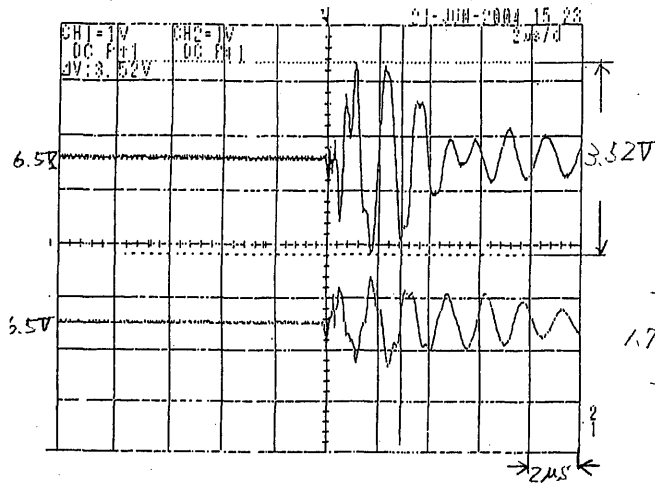
通常状態+第1よう素吸着塔ヒーターON
(安全棒B読み値)



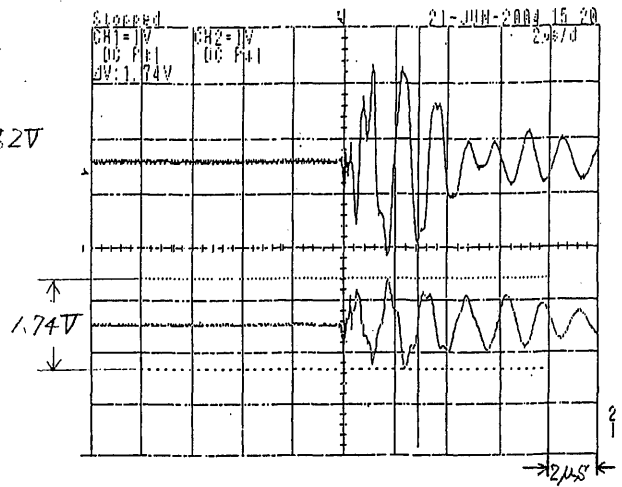
通常状態+第2よう素吸着塔ヒーターON
(安全棒A読み値)

通常状態+第2よう素吸着塔ヒーターON
(安全棒B読み値)

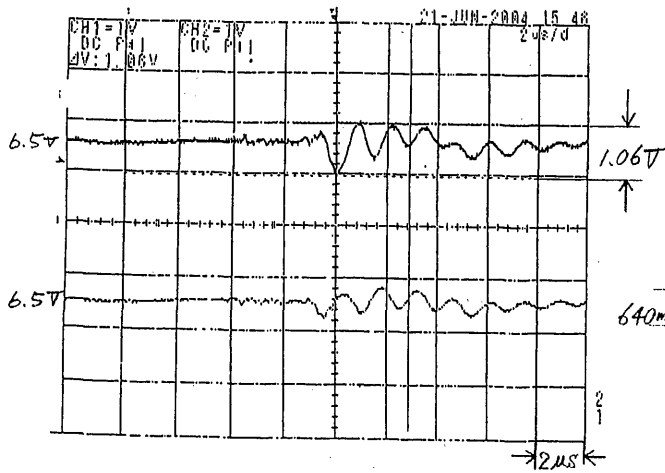
図15 安全棒励磁電流回路へのノイズ (2/4)



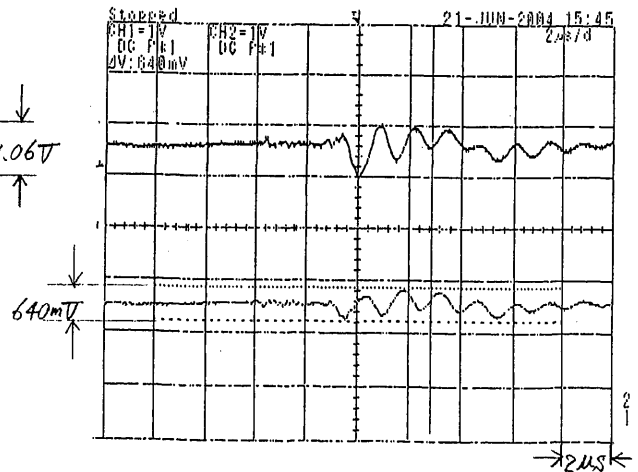
通常状態+第3よう素吸着塔ヒーターON
(安全棒A読み値)



通常状態+第3よう素吸着塔ヒーターON
(安全棒B読み値)

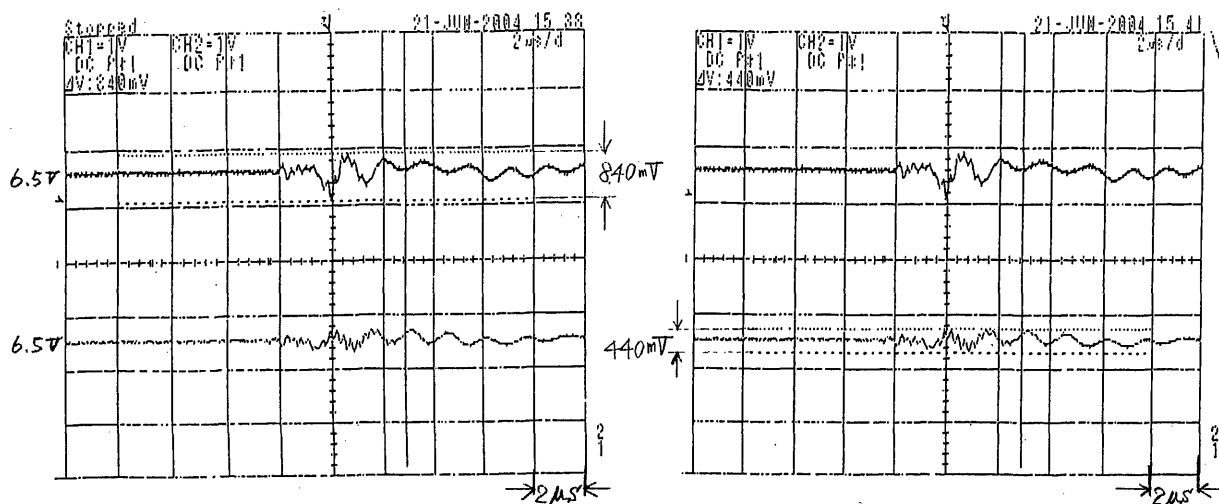


通常状態+Tr棒電動駆動
(安全棒A読み値)



通常状態+Tr棒電動駆動
(安全棒B読み値)

図15 安全棒励磁電流回路へのノイズ (3/4)



通常状態 + Tr 棒パルス引抜き
(安全棒 A 読み値) *2

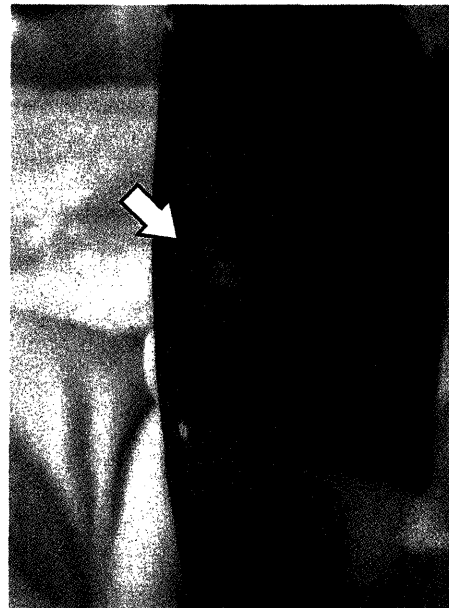
通常状態 + Tr 棒パルス引抜き
(安全棒 B 読み値) *2

*2: Tr 棒パルス引抜きでは Tr 棒が上限に到達する際の音がしてからノイズが発生するまでに間隔があったので電動部の駆動によるノイズであると考えられる。

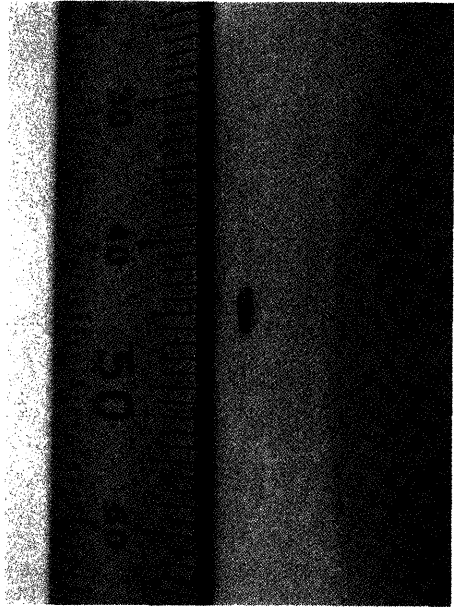
図15 安全棒励磁電流回路へのノイズ (4 / 4)



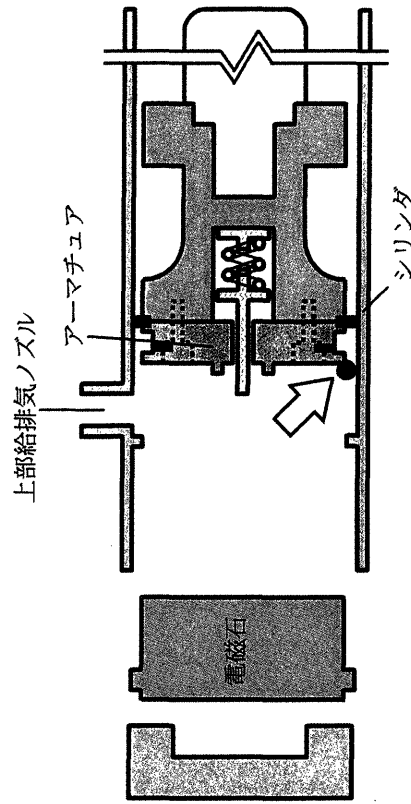
(a) ポリエチレンシート片
(長さ約13mm×幅約5mm×厚さ約0.2mm)



(b) ポリエチレンシート片
発見時の状態



(c) 金属片 (SUS304)
(長さ約3mm×幅約1mm×厚さ約0.05mm)



(d) 異物発見箇所 (図中矢印)

図16 安全棒Aで発見された異物及び発見時の状況

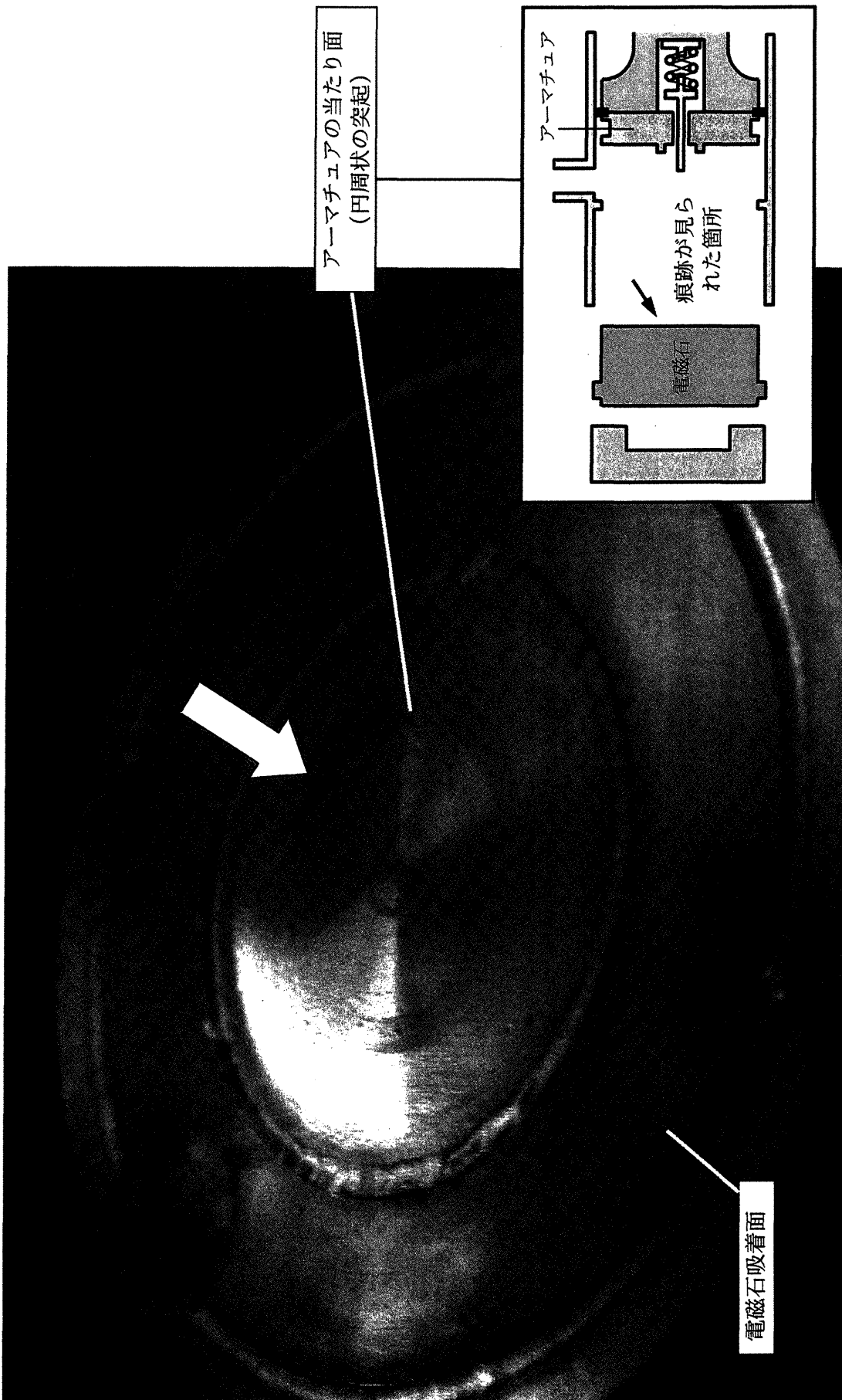


図17 異物の挟み込みにより生じたと思われる痕跡
(図中矢印部に長さ約 10 mm、幅約 2 mm の汚れが認められる。)

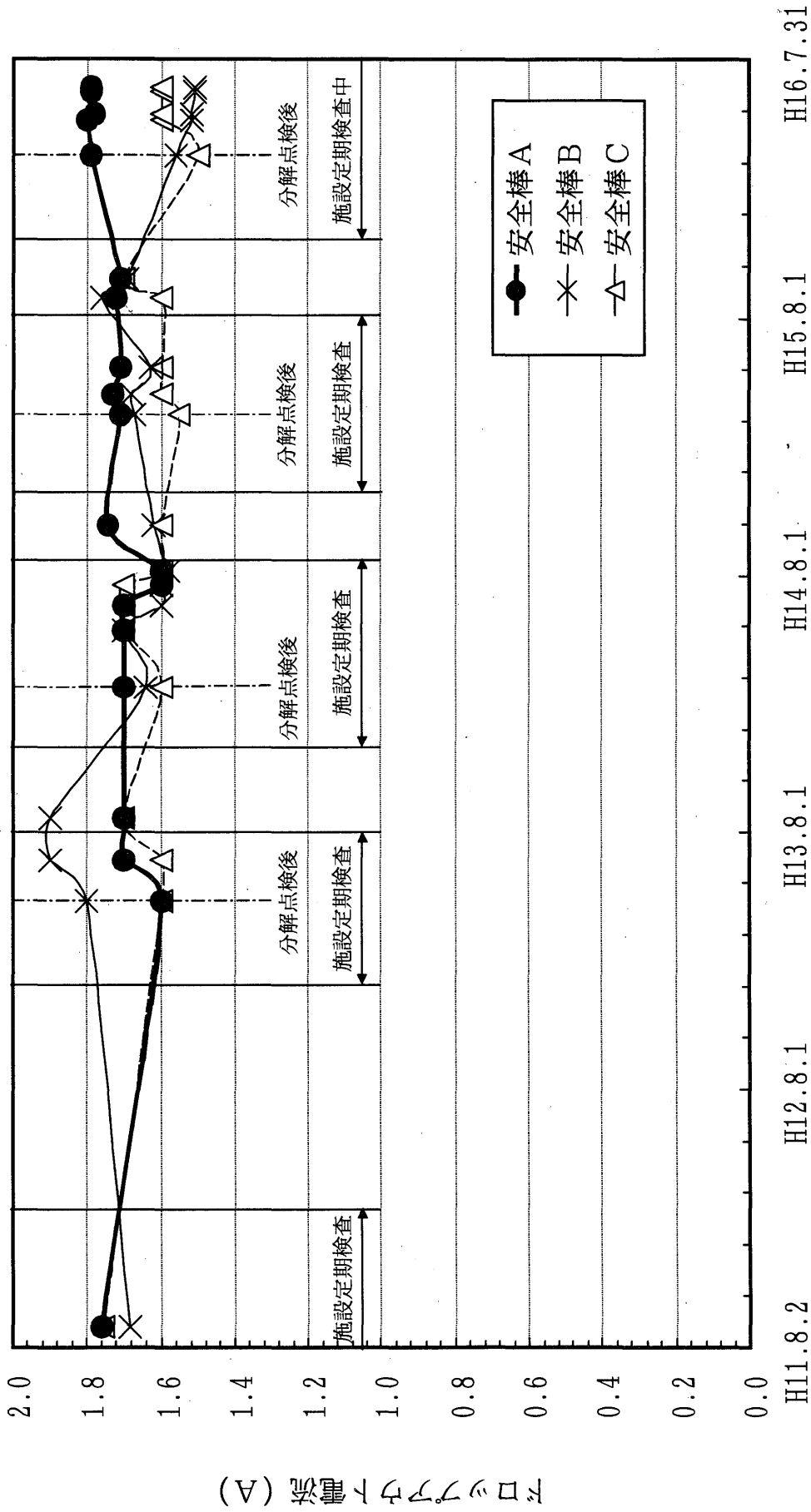


図18 安全棒ドロップアウト電流の経年変化

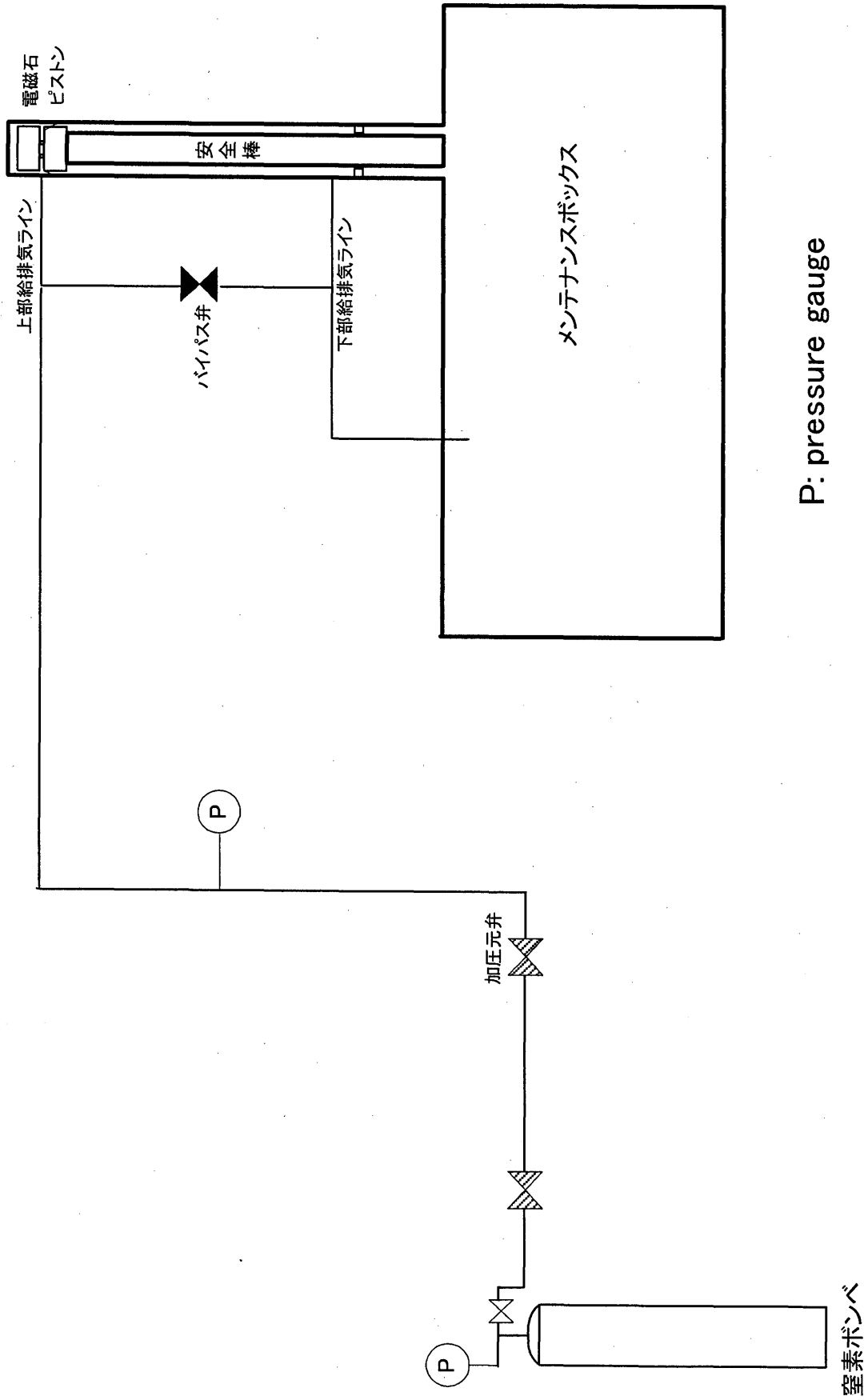


図19 安全棒加圧落下試験装置の概要

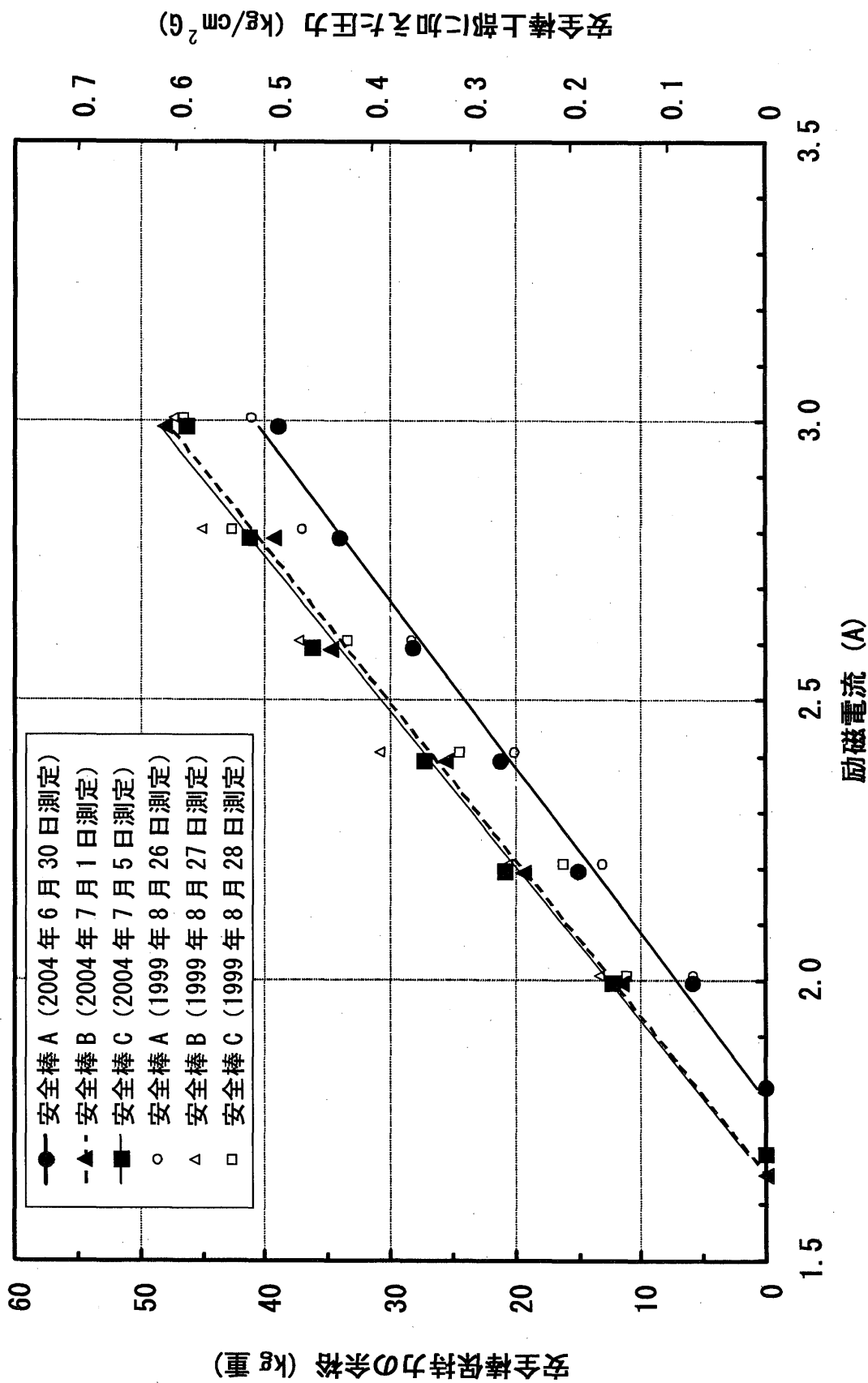


図20 実際の使用状態における安全棒保持力の余裕

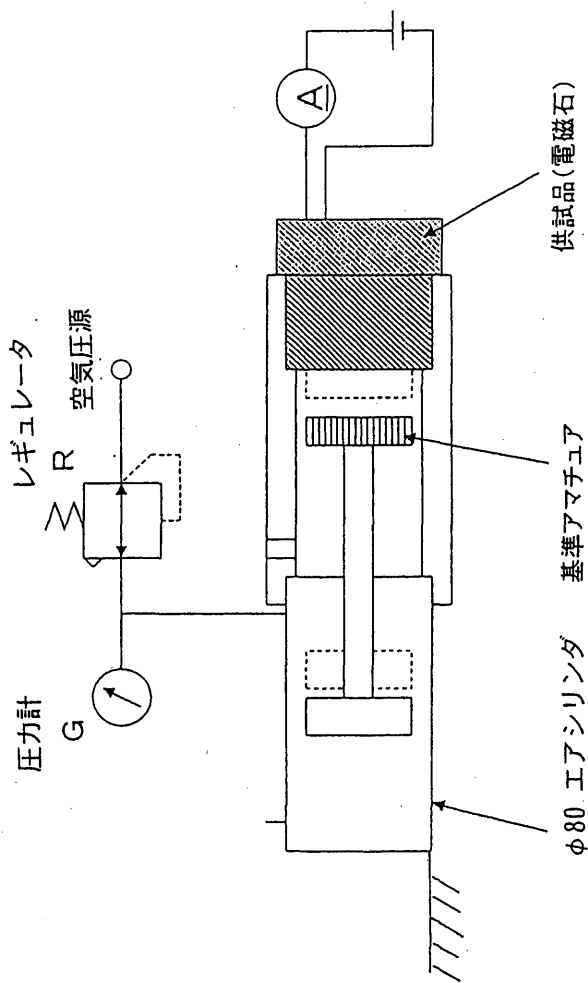


図21 安全棒電磁石吸着力の測定装置

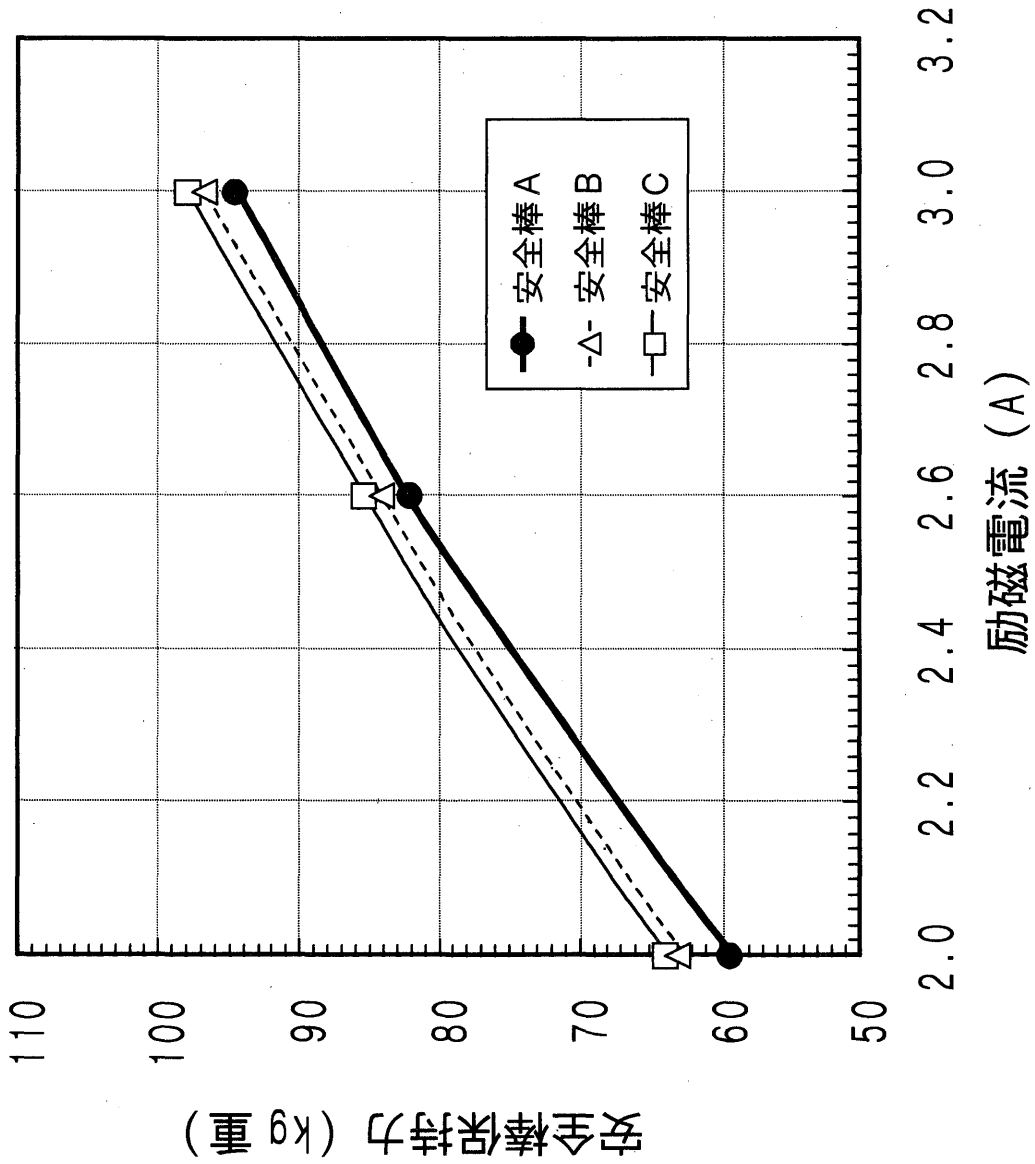


図22 安全棒電磁石単体の吸着力

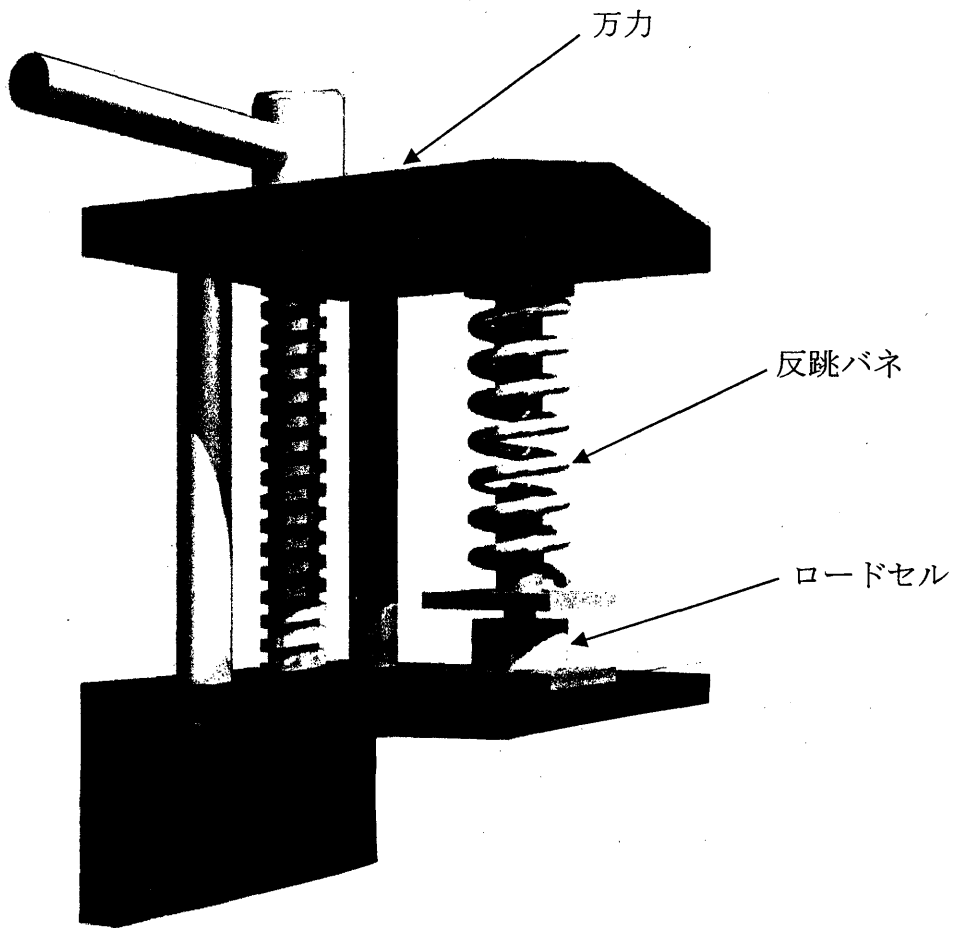


図23 反跳バネの測定装置

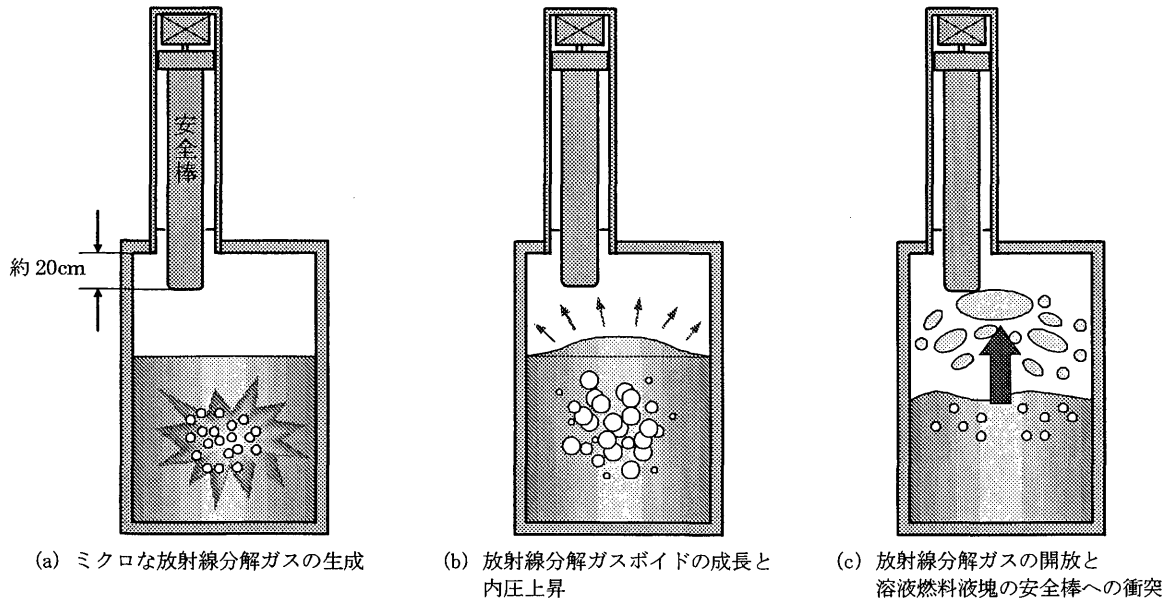


図 24 過渡出力運転時の水撃力発生機構

実験方法

1. 標準物質であるpolyethyleneシートおよびVinyl acetateシートをハンドプレス(5トン)を用いて試料厚を統一してから測定(図中の黒及び青線)

2. 未知試料の一部をハサミで切り、ハンドプレスで表面を平滑にしてから測定(図中の赤)

実験装置 BIO-RAD FTS-135 Dura sample II (ATR ダイヤモンドセル) 反射法にて測定

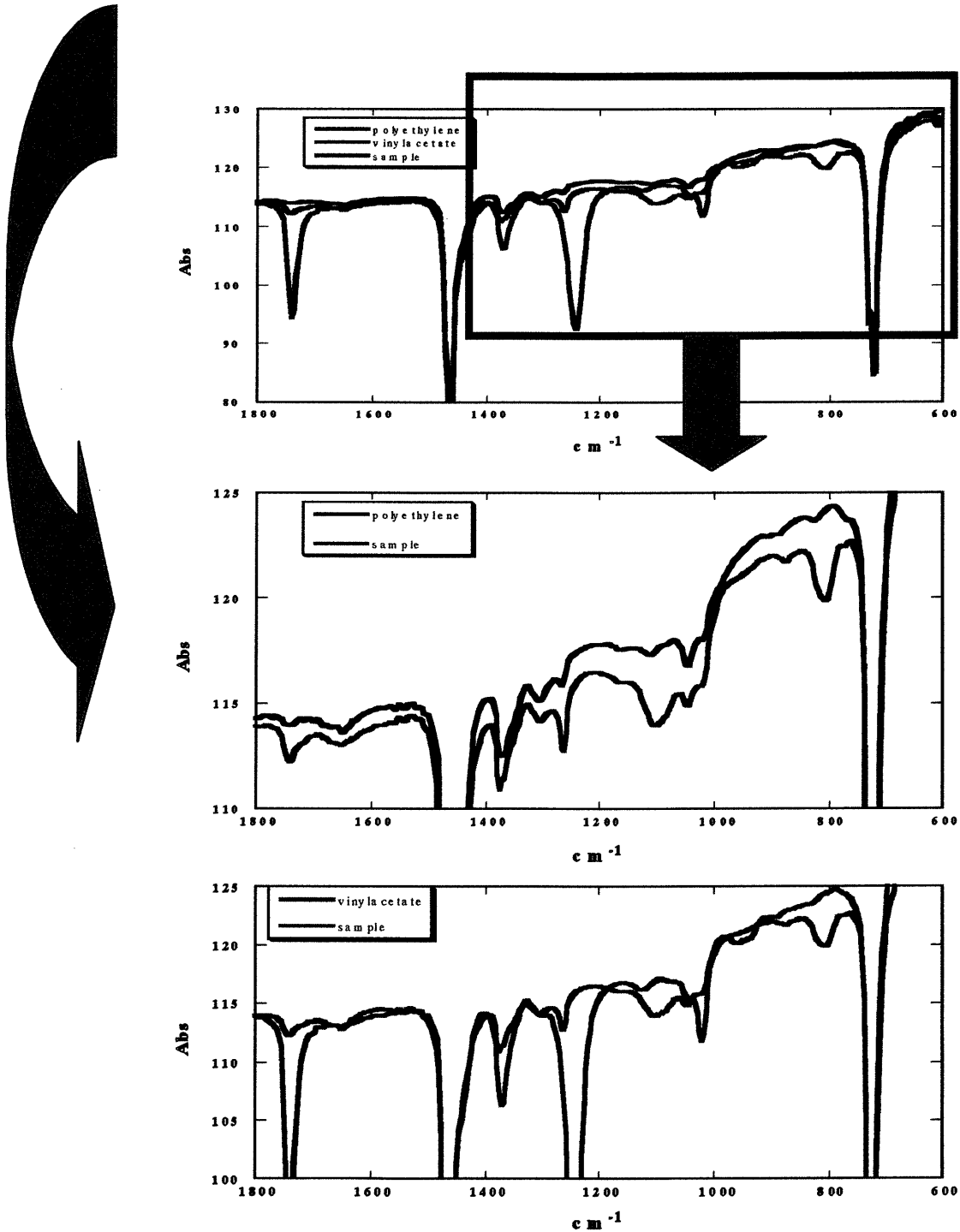


図25 異物(ビニール状小片)の分析結果



図26 異物（黒色小片）の観察結果

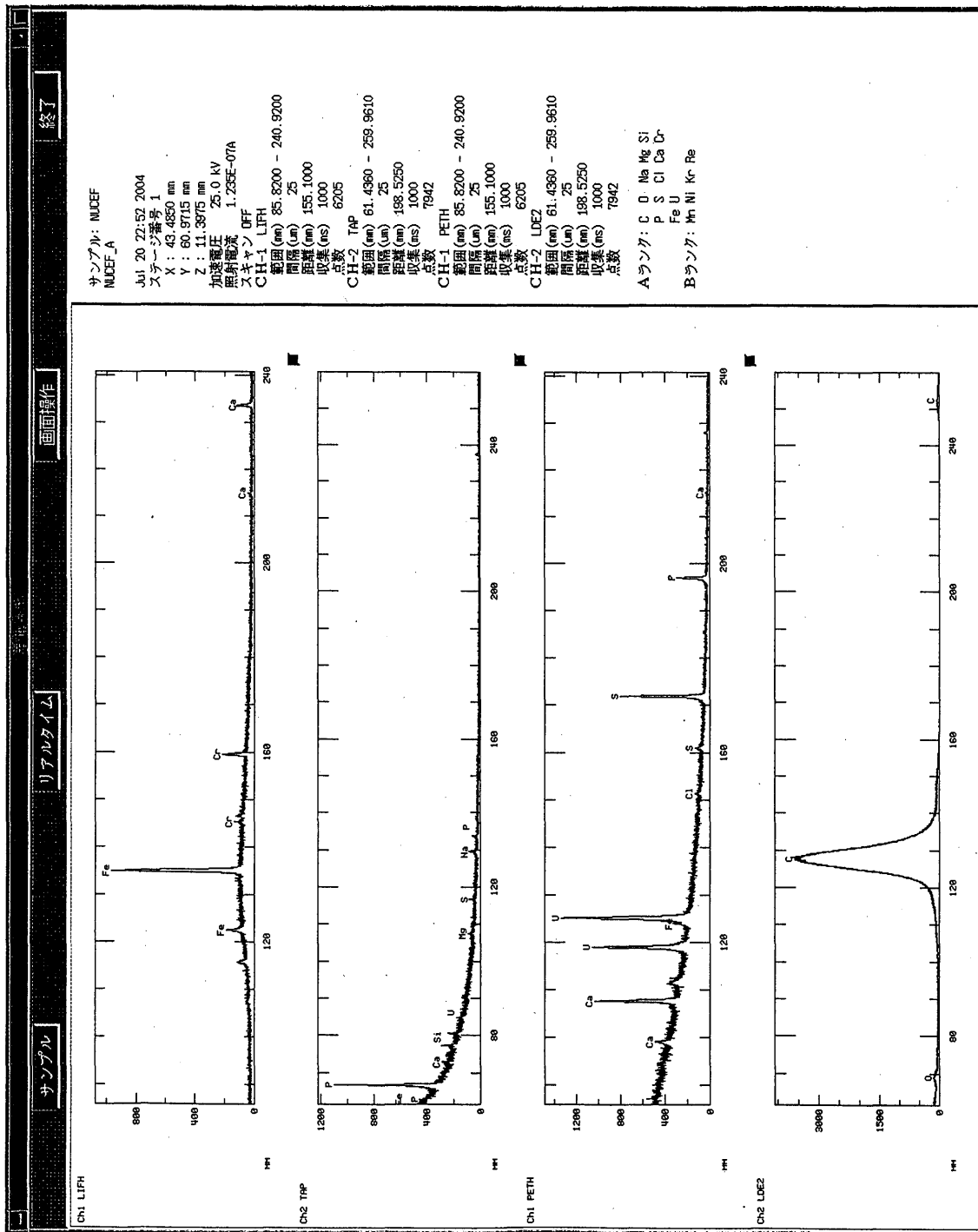


図27 異物 (黒色小片) の分析結果

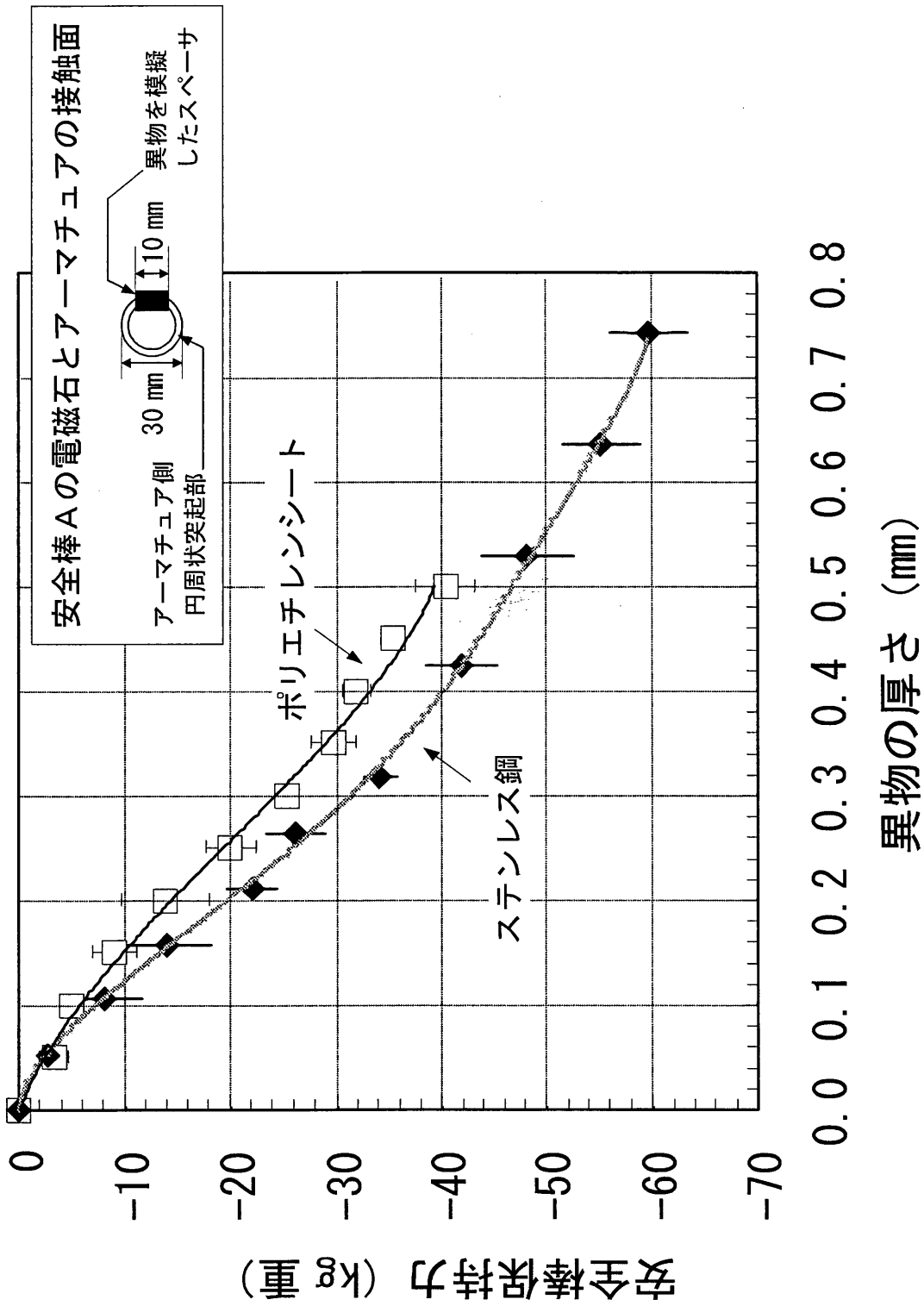


図29 異物の挟み込みによる電磁石吸着力の低下

国際単位系 (SI) と換算表

表1 SI基本単位および補助単位

量	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質質量	モル	mol
光度	カンデラ	cd
平面角	ラジアン	rad
立体角	ステラジアン	sr

表3 固有の名称をもつSI組立単位

量	名称	記号	他のSI単位による表現
周波数	ヘルツ	Hz	s ⁻¹
力	ニュートン	N	m·kg/s ²
圧力, 応力	パスカル	Pa	N/m ²
エネルギー, 仕事, 熱量	ジュール	J	N·m
工率, 放射束	ワット	W	J/s
電気量, 電荷	クーロン	C	A·s
電位, 電圧, 起電力	ボルト	V	W/A
静電容量	ファラド	F	C/V
電気抵抗	オーム	Ω	V/A
コンダクタンス	ジーメンズ	S	A/V
磁束	ウェーバ	Wb	V·s
磁束密度	テスラ	T	Wb/m ²
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A
セルシウス温度	セルシウス度	°C	
光束	ルーメン	lm	cd·sr
照度	ルクス	lx	lm/m ²
放射能	ベクレル	Bq	s ⁻¹
吸収線量	グレイ	Gy	J/kg
線量当量	シーベルト	Sv	J/kg

表2 SIと併用される単位

名称	記号
分, 時, 日	min, h, d
度, 分, 秒	°, ', "
リットル	l, L
トン	t
電子ボルト	eV
原子質量単位	u

1 eV = 1.60218 × 10⁻¹⁹ J
1 u = 1.66054 × 10⁻²⁷ kg

表4 SIと共に暫定的に維持される単位

名称	記号
オングストローム	Å
バ	b
バル	bar
ガリ	Gal
キュリー	Ci
レントゲン	R
ラド	rad
レム	rem

1 Å = 0.1 nm = 10⁻¹⁰ m
1 b = 100 fm² = 10⁻²⁸ m²
1 bar = 0.1 MPa = 10⁵ Pa
1 Gal = 1 cm/s² = 10⁻³ m/s²
1 Ci = 3.7 × 10¹⁰ Bq
1 R = 2.58 × 10⁻⁴ C/kg
1 rad = 1 cGy = 10⁻² Gy
1 rem = 1 cSv = 10⁻² Sv

表5 SI接頭語

倍数	接頭語	記号
10 ¹⁸	エクサ	E
10 ¹⁵	ペタ	P
10 ¹²	テラ	T
10 ⁹	ギガ	G
10 ⁶	メガ	M
10 ³	キロ	k
10 ²	ヘクト	h
10 ¹	デカ	da
10 ⁻¹	デシ	d
10 ⁻²	センチ	c
10 ⁻³	ミリ	m
10 ⁻⁶	マイクロ	μ
10 ⁻⁹	ナノ	n
10 ⁻¹²	ピコ	p
10 ⁻¹⁵	フェムト	f
10 ⁻¹⁸	アト	a

(注)

- 表1-5は「国際単位系」第5版、国際度量衡局1985年刊行による。ただし、1 eV および 1 u の値は CODATA の1986年推奨値によった。
- 表4には海里、ノット、アール、ヘクタールも含まれているが日常の単位なのでここでは省略した。
- bar は、JISでは流体の圧力を表わす場合に限り表2のカテゴリーに分類されている。
- EC閣僚理事会指令では bar, barn および「血圧の単位」mmHgを表2のカテゴリーに入れている。

換算表

力	N (=10 ⁵ dyn)	kgf	lbf
	1	0.101972	0.224809
	9.80665	1	2.20462
	4.44822	0.453592	1

粘度 1 Pa·s (N·s/m²) = 10 P (ポアズ) (g/(cm·s))
動粘度 1 m²/s = 10⁴ St (ストークス) (cm²/s)

圧	MPa (=10 bar)	kgf/cm ²	atm	mmHg (Torr)	lbf/in ² (psi)
	1	10.1972	9.86923	7.50062 × 10 ³	145.038
力	0.0980665	1	0.967841	735.559	14.2233
	0.101325	1.03323	1	760	14.6959
	1.33322 × 10 ⁻⁴	1.35951 × 10 ⁻³	1.31579 × 10 ⁻³	1	1.93368 × 10 ⁻²
	6.89476 × 10 ⁻³	7.03070 × 10 ⁻²	6.80460 × 10 ⁻²	51.7149	1

エネルギー・仕事・熱量	J (=10 ⁷ erg)	kgf·m	kW·h	cal (計量法)	Btu	ft·lbf	eV
	1	0.101972	2.77778 × 10 ⁻⁷	0.238889	9.47813 × 10 ⁻⁴	0.737562	6.24150 × 10 ¹⁸
	9.80665	1	2.72407 × 10 ⁻⁶	2.34270	9.29487 × 10 ⁻³	7.23301	6.12082 × 10 ¹⁹
	3.6 × 10 ⁶	3.67098 × 10 ⁵	1	8.59999 × 10 ⁵	3412.13	2.65522 × 10 ⁶	2.24694 × 10 ²⁵
	4.18605	0.426858	1.16279 × 10 ⁻⁶	1	3.96759 × 10 ⁻³	3.08747	2.61272 × 10 ¹⁹
	1055.06	107.586	2.93072 × 10 ⁻⁴	252.042	1	778.172	6.58515 × 10 ²¹
	1.35582	0.138255	3.76616 × 10 ⁻⁷	0.323890	1.28506 × 10 ⁻³	1	8.46233 × 10 ¹⁸
	1.60218 × 10 ⁻¹⁹	1.63377 × 10 ⁻²⁰	4.45050 × 10 ⁻²⁶	3.82743 × 10 ⁻²⁰	1.51857 × 10 ⁻²²	1.18171 × 10 ⁻¹⁹	1

1 cal = 4.18605 J (計量法)
= 4.184 J (熱化学)
= 4.1855 J (15 °C)
= 4.1868 J (国際蒸気表)
仕事率 1 PS (仏馬力)
= 75 kgf·m/s
= 735.499 W

放射能	Bq	Ci
	1	2.70270 × 10 ⁻¹¹
	3.7 × 10 ¹⁰	1

吸収線量	Gy	rad
	1	100
	0.01	1

照射線量	C/kg	R
	1	3876
	2.58 × 10 ⁻⁴	1

線量当量	Sv	rem
	1	100
	0.01	1

TRACY安全棒誤作動(2004年6月17日発生)に関する調査報告書



古紙配合率100%
白色度70%再生紙を使用しています