

JAERI-Tech

2000-070



JP0150172



イメージングプレートによるJRR-2
一次冷却系重水用アルミニウム配管中の
トリチウム量の測定

2000年12月

本石 章司・小林 勝利・佐伯 秀也*

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、お申し越しください。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おこなっております。

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, 2000

編集兼発行 日本原子力研究所

イメージングプレートによる JRR-2 一次冷却系重水用アルミニウム配管中のトリチウム量の
測定

日本原子力研究所東海研究所研究炉部
本石 章司 ・ 小林 勝利 ・ 佐伯 秀也*

(2000 年 9 月 20 日受理)

JRR-2 は、36 年間（1960-1996）運転された重水冷却型原子炉であり、現在は廃止措置が進められている。その中で、一次冷却系重水の循環系統として使用された配管及び機器類に浸透しているトリチウム量の評価が重要となっている。

アイソトープ開発室では、イメージングプレート（IP）と液体シンチレーションカウンター（LSC）及び高純度ゲルマニウム検出器（HPGe）を併用し、アルミニウム配管中のトリチウム量と、深度方向への浸透深さを測定し、評価する方法を開発した。

フッ化水素酸溶液に浸食されにくいアクリル塗料を、アルミニウム配管のトリチウム汚染面を除く部分に塗布し、1.5%（1.21M）フッ化水素酸溶液で汚染面の酸化被膜のみ一定時間（3 分）溶解し IP、重量測定を行うと共に、溶解液を LSC で測定した。その結果、トリチウムは深度方向に $25 \mu\text{m}$ 浸透していることを確認した。また、その 90% は $7 \mu\text{m}$ 以内に分布することを確認した。

東海研究所：〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2-4

* (財) 放射線利用振興協会

Measurement of Tritium Activity in the Aluminum Pipe of JRR-2 Heavy Water Primary
Cooling System Using Imaging Plate

Shoji MOTOISHI, Katsutoshi KOBAYASHI and Hideya SAEKI*

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

(Received September 20, 2000)

JRR-2 is the heavy water cooling type nuclear reactor, which has been operated for 36 years (1960-1976) and in the process of decommissioning at present. For this reason, evaluation of tritium quantity permeated into the pipe and apparatus of the primary coolant heavy water circulating system is important.

In the Radioisotope Production Division, activity of tritium in aluminum pipe was measured with imaging plate (IP), liquid scintillation analyzer and high purity germanium detector (HPGe).

After acrylic paints was applied for the region except for tritium contamination on the surface of aluminum pipe, only the oxidized contaminated part was dissolved by 1.5%(1.21M) HF for 3 minutes, and measured with IP. As a result, the tritium was found to permeate in the depth of 25 μ m. Moreover, 90% of it was found to be distributed within 7 μ m.

Keywords : JRR-2, Primary Heavy Water Coolant, Tritium, Aluminum Pipe, Aluminum Oxidized, Imaging Plate, Hydrofluoric Acid, Acrylic Paints, Penetrative Depth, PSL Conversion Coefficient

* Radiation Application Development Association

目次

1. 序論	1
2. 重水配管試料の I P 及び HPGe による予備測定	1
2. 1 試料の作成	1
2. 2 重水用配管試料の I P 及び HPGe による予備測定	2
3. 1 M NaOH 溶液による重水用アルミニウム配管溶解実験	2
3. 1 1 M NaOH 溶液によるアルミニウム溶解実験（コールド）	2
3. 2 1 M NaOH 溶液による重水用アルミニウム配管溶解実験	3
4. HF 溶液による重水用アルミニウム配管溶解実験	3
4. 1 2.2% HF 溶液による重水用アルミニウム配管 (Al-1) 溶解予備実験	3
4. 2 1.5% (1.20M) HF 溶液による重水用アルミニウム配管 (Al-2) 溶 解実験	4
4. 3 2.2% 及び 1.5% HF 溶液中のトリチウム量の測定	4
5. 非汚染面をアクリル塗料で被覆した重水用アルミニウム配管試料の溶解実験	5
5. 1 試料の作成	5
5. 2 アクリル塗料の 1.5% (1.21M) HF 溶液に対する耐浸食試験	5
5. 3 1.5% (1.21M) HF 溶液による重水用アルミニウム配管 (Al-5) 溶 解実験	5
5. 4 1.5% (1.21M) HF 溶液中のトリチウム量の測定	6
5. 5 1.5% (1.21M) HF 溶液による重水用アルミニウム配管 (Al-6) の 溶解速度確認実験（アクリル塗料被覆無し）	6
6. ^{60}Co 標準線源を用いた重水用アルミニウム配管中の ^{60}Co の I P への寄与の 測定	6
7. 重水用アルミニウム配管中のトリチウム量の測定	7
8. 結論	8
謝辞	9
参考文献	9

Contents

1. Introduction	1
2. Preliminary Radioactivity Measurement of Pipe Sample for Primary Heavy Water Coolant Using IP and HPGe	1
2.1 Preparation of Pipe Sample	1
2.2 Preliminary Radioactivity Measurement of Pipe Sample for Heavy Water Coolant Using IP and HPGe	2
3. Dissolving of Aluminum Pipe for Heavy Water Coolant by 1M NaOH Solution	2
3.1 Dissolving of Aluminum Pipe by 1M NaOH Solution (nonactive)	2
3.2 Dissolving of Aluminum Pipe for Heavy Water Coolant by 1M NaOH Solution	3
4. Dissolving of Aluminum Pipe for Heavy Water Coolant by HF Solution	3
4.1 A Preliminary Dissolving of Aluminum Pipe (Al-1) for Heavy Water Coolant by 2.2%HF Solution	3
4.2 Dissolving of Aluminum Pipe (Al-2) for Heavy Water Coolant by 1.5% (1.20M) HF Solution	4
4.3 Measurement of Tritium Activity in the Solution Dissolved by 2.2% and 1.5%HF	4
5. Dissolving of Aluminum Pipe for Heavy Water Coolant which Acrylic Paint was Applied on Non-contaminated Surface	5
5.1 Preparation of Pipe Sample	5
5.2 Erosion Test of Acrylic Paint by 1.5% (1.21M) HF Solution	5
5.3 Dissolving of Aluminum Pipe (Al-5) for Heavy Water Coolant by 1.5% (1.21M) HF Solution	5
5.4 Measurement of Tritium Activity in the Solution Dissolved 1.5%(1.21M) HF	6
5.5 Dissolving Rate Evaluation of Aluminum Pipe (Al-5) for Heavy Water Coolant by 1.5% (1.21M) HF Solution (without Acrylic Paint)	6
6. Estimation of Contribution ^{60}Co to IP of in Aluminum Pipe for Heavy Water Coolant Using ^{60}Co Standard Source	6
7. Measurement of Tritium Activity in Aluminum Pipe for Heavy Water Coolant	7
8. Conclusions	8
Acknowledgement	9
References	9

1. 序論

JRR-2 は、1960 年 10 月に初臨界後 1996 年 12 月に停止するまで、36 年間の長期に渡り R I の生産、燃料・材料照射試験及び医療照射などに幅広く利用されてきた重水冷却型原子炉である。現在は、原子炉の廃止措置が進められており、一次冷却用重水 (${}^3\text{T}$ 濃度: $4.3 \times 10^7 \text{ Bq}/\text{cm}^3$, 1997 年 5 月)¹⁾ の循環系統であった配管及び機器類（ステンレス: 34 トン、アルミニウム: 2 トン）に付着・浸透しているトリチウム量を正確に評価することが重要となっている。

評価に当たって、トリチウムは低エネルギー β 線放出核種であること、取扱いが容易でないことから正確な放射能量の評価が難しい。さらに、トリチウムの浸透深さを求める上でアルミニウム配管内面に酸化被膜を形成し、これが難溶性であることから、溶剤に対して均一に溶解しているかどうかの評価が難しいという問題があった。

筆者らは、イメージングプレート（以下「IP」と記す）を使用して、放射化したラット切片中の ${}^{32}\text{P}$ や ${}^{45}\text{Ca}$ の影響を避け、目的核種である ${}^{153}\text{Gd}$ の放射線分布を画像化した経験²⁾ から、IP 法が検出感度に優れ、測定範囲が広く直線性があることに加えて、何よりも放線能分布を 2 次元画像として処理できる特徴に着目した。すなわち、IP 法に液体シンチレーションカウンター（以下「LSC」と記す）を併用することにより、JRR-2 で使用されたアルミニウム配管及びステンレス配管中のトリチウムの、深度方向への放射線分布が得られるのではないかという見通しのもとに、種々の実験を試みた。また、配管にはトリチウム以外に原子炉の中性子照射によって生成する ${}^{60}\text{Co}$ などの放射性核種や核分裂生成物などの混入も考えられ、高純度ゲルマニウム検出器（以下「HPGe」と記す）による γ 線測定を同時にを行い、トリチウムの IP 測定値に与える影響についても評価した。

本稿では、第 2 章において IP 及び HPGe を用いたステンレス及びアルミニウム配管の放射線予備測定結果について述べる。第 3 章では、アルミニウム配管の酸化被膜の水酸化ナトリウム溶液（以後「NaOH 溶液」と記す）による溶解と IP 及び HPGe を用いた測定結果について述べる。第 4 章では、NaOH 溶液に代わりフッ化水素酸溶液（以後「HF 溶液」と記す）を用いた酸化被膜の溶解と IP 及び HPGe を用いた測定結果について述べる。第 5 章では、アルミニウム配管の酸化被膜のみについて着目し、非汚染面に HF 溶液に不溶性のアクリル塗料を塗布することにより、より正確な深度方向へのトリチウム量を評価した結果について述べる。第 6 章では、配管内面に付着・浸透している ${}^{60}\text{Co}$ の IP に対する寄与を調べるために、標準試料を作成して ${}^{60}\text{Co}$ の PSL 値を求め評価した結果について述べる。最後の 7 章では、トリチウム捕集装置を作成してアルミニウムの融点前後で加熱・捕集し、配管に浸透しているトリチウムの総量を評価した結果について述べる。

2. 重水配管試料の IP 及び HPGe による予備測定

JRR-2 で使用された重水用アルミニウム及びステンレス配管を Photo. 1 に示す。これらの試料について IP 及び HPGe により予備測定を実施した。以下に測定試料の作成と測定結果について記す。

2. 1 試料の作成

① ステンレス配管

ステンレス配管は、1インチ管長さ約30mmの試料のうち幅約10mmを切断し、IPでの測定が容易なように平面に延伸加工した(SUS-1、Photo. 1参照)。残った管(SUS-2)は、切断面を金ヤスリと紙ヤスリを使用して平滑に仕上げた。それぞれの試料形状はTable 1の通りである。

② アルミニウム配管

アルミニウム配管は、10インチ管の一部の切片(30^W×30^H×10^t)で、写真は切片を2分割し、切断面を金ヤスリとペーパーヤスリを使用してを平滑に仕上げた。小切片をAl-1とした。大切片は写真撮影後更に大切片と小切片に更に2分割し、それぞれAl-2及びAl-3とした。それぞれの試料形状はTable 2及びFig. 1の通りである。

2. 2 重水用配管試料のIP及びHPGeによる予備測定

写真1の試料について、バイオイメージングアナライザ(富士フィルム株式会社製BAS-5000)及び γ 線自動測定装置(測定解析ソフト 東陽テクニカ製 PCGAM-III)を用いて予備測定を行った。その結果をTable 3及びPhoto. 2に示す。なお、BAS-5000の測定条件は、特に指定がない限り下記の条件で行った。

使用IP	: BAS-TR2025(トリチウム専用 ³⁾)
露光時間	: 3時間
露出-読取時間	: 3分
感度	: S=30000
階調	: 65,536階調
読取画素	: 25 μ m

露光時間は、試料のPSL値⁴⁾が10⁴オーダーになる時間を選定した。

予備測定の結果、ステンレス配管とアルミニウム配管ではIP測定においてアルミニウム試料の方がPSL値が2桁高いという対照的な結果となった。 γ 線測定による⁶⁰Coの放射能量は、2~7Bq(形状による補正は無し)であり両方の試料にIP測定結果ほどの顕著な優位差が認められなかった。以上のことから、アルミニウム配管のPSL値のほとんどはトリチウムであることが想定された。Photo. 2の結果から、ステンレス配管にトリチウムが浸透していたとしても、⁶⁰Coも含めたPSL測定値が500前後であり、IP測定では良好な結果を得ることは難しいと判断した。以上のことから、IPによるトリチウムの測定に関してはアルミニウム配管についてのみ進めることとした。

Photo. 3は、ステンレス配管を直接IPにより40時間測定した結果で、配管に濃度差があり横行配管の底辺部分に⁶⁰Coが主に付着・浸透した結果と考えられる。

なお、Table 3に示すAl-1及びAl-2の⁶⁰Co放射能量については、配管が上下走行部に設置されたものであり均一に分布していると仮定しAl-3の値からそれぞれのPSL値もとに計算した値を採用した。

3. 1 M NaOH溶液による重水用アルミニウム配管溶解実験

3. 1 1 M NaOH溶液によるアルミニウム溶解実験(コールド)

初めに、アルミニウムペレット ($20.05\phi \times 12.95\text{mmL}$) を使用し、1 M NaOH 溶液による溶解量の測定を行った。1 バッチ当たりの溶解は下記の条件で行った。

溶解液 : 1 M NaOH 溶液

溶解液量 : 50ml

溶解時間 : 5 分

洗浄 : 精製水、エチルアルコール、アセトン

溶解量(深度方向 μm)は、アルミニウムペレットの表面積と溶解後の重量測定法(Al 密度: 2.70 g/cm^3)⁵⁾により求めた。結果を Fig. 2 に示す。単位時間(5 分)当たりの溶解量は約 0.46 mg/cm^2 (深度方向で約 $1.7\mu\text{m}$) で、1 時間当たり 5.5 mg/cm^2 ($20.3\mu\text{m}$) であった。

3. 2 1 M NaOH 溶液による重水用アルミニウム配管溶解実験

Al-1 の試料を使用し、前項 3. 1 と同じ条件で溶解の後、IP 測定、 γ 線測定及び重量法による溶解量を測定した。その結果を Table 4、Fig. 3 ~ 4 及び Photo. 4 に示す。溶解量(Fig. 3 参照)についてみると、コールド試験時より単位時間当たりの溶解量が約 1.5 倍大きいことが確認された。これは、コールド用のアルミニウムペレットが JIS H1050 の高純度アルミニウムであるのに対して、重水用アルミニウム配管が工業用配管であることの品質の差によるものと考えられる。一方 PSL 値(Table 4、Photo. 4 参照)についてみると、溶解 105 分後においても約 5 % しか減少せず、重水用アルミニウム配管内面が 1 M NaOH 溶液においてほとんど溶解しないことが確認された。この原因として、アルミニウム配管内面が 1 M NaOH 溶液では溶解しにくい酸化被膜が形成されているためと考えられ、1 M NaOH 溶液による溶解実験を 105 分で中止した。

4. HF 溶液による重水用アルミニウム配管溶解実験

4. 1 2.2%HF 溶液による重水用アルミニウム配管(Al-1) 溶解予備実験

Al 棒 ($\sim 10\text{mm}\phi$) の一部を切断し、1 M NaOH 溶液による溶解に代わり、約 22% HF 溶液により溶解実験を行った。その結果、11.4742 g の試料について 3 分 10 秒後には 1.1208g (10.1%) の溶解量であった。この溶解量が 1 M NaOH 溶液による実験に比し大きかったことから、1/10 に希釈した 2.2% HF 溶液で重水用アルミニウム配管の溶解実験を試みた。溶解は下記の条件で行った。

試料 : Al-1

溶解液 : 2.2% HF 溶液

溶解液量 : 30ml

溶解時間 : 3 分

洗浄・乾燥 : 精製水、エチルアルコール、アセトン

試料は、前項 3. 2 の実験に使用した Al-1 試料をそのまま使用した。その結果を Table 5 及び Fig. 5 ~ 6 に示す。また、各バッチ毎に試料乾燥後 IP 測定を実施した結果を Photo. 5 に示す。1 バッチ当たりの溶解量は、Table 5 及び Fig. 5 からもわかるように 6 分及び 15 分とでは約 1.5 倍の差があり、2.2% HF 溶液においても試料の表面状態に影響されていることが確認さ

れた。Fig. 6 は、2.2% HF 溶液による溶解量が汚染面も含めて均一であると仮定し、汚染面表面から深度方向の放射能量を PSL 値で示したもので、5 バッチ目の 15 分では 99% 以上が溶解により減少し、その溶解量は約 $24 \mu\text{m}$ であった。

4. 2 1.5% (1.20M) HF 溶液による重水用アルミニウム配管 (Al-2) 溶解実験

本実験では、前項の予備実験より測定点を多くすることを目的に、HF 溶液の濃度を薄めて 1.5% (1.20M) とした。モル濃度は、0.1M NaOH 標準溶液により滴定し求めた。溶解は下記の条件で行った。

試 料 : Al-2
 溶 解 液 : 1.5% (1.20M) HF 溶液
 溶解液量 : 30ml
 溶解時間 : 3 分
 洗浄・乾燥: 精製水、エチルアルコール、アセトン

その結果を Table 6 及び Fig. 7 ~ 8 に示す。また、各バッチ毎の IP による放射能測定結果を Photo. 6 に示す。

1.5% HF 溶液による重水用アルミニウム配管の溶解量は、2.2% の場合とほぼ同じ傾向であった (Fig. 7 参照)。特に、PSL 値がほぼ 99% 減少する $20 \mu\text{m}$ あたりで一つのしきい値が見られ、それまでは単位時間当たりの溶解量は減少するが、それ以降はほぼ同じ割合で溶解する傾向が見られた。今後の考察では、それぞれの測定点において均一に溶解しているものと仮定し評価した。

重水用アルミニウム配管の深度方向への PSL 値と、 ^{60}Co の放射能測定結果を Fig. 8 に示す。 ^{60}Co については、約 $8 \mu\text{m}$ でほとんど無くなり、トリチウムは予備実験とほぼ同じ傾向がみられ約 $20 \mu\text{m}$ で 99% 無くなり、 $24 \mu\text{m}$ では 99.8% まで無くなることが確認された。

4. 3 2.2% 及び 1.5% HF 溶解液中のトリチウム量の測定

4. 1 及び 4. 2 の実験で使用した 2.2% 及び 1.5% HF 溶解液中のトリチウム量を、LSC を用いて測定した。測定は下記の条件で行った。

LSC : LSC-6000 (アロカ株式会社製)
 試料採取料 : 1.5% (1.20M) HF 溶解液 2 ml
 シンチレータ : AQUASOL-2 10ml
 測定時間 : 30 分

測定結果を Fig. 9 ~ 10 に示す。1.5% (1.20M) HF 溶液による溶解実験の結果では、最初の 3 分で 62%、次の 3 分では 30% のトリチウムが溶液中に検出された。深度方向でみれば、約 $6 \mu\text{m}$ 以内に約 90% 以上が含まれていることが確認できた。2.2% HF 溶液による溶解実験の結果では、最初の 3 分、約 $6 \mu\text{m}$ でほぼ 86% のトリチウムが溶液中に検出された。2.2% HF 溶解液は、試料が NaOH 溶解実験に使用したものであることから、結果は参考値としかならないが 1.5% HF 溶解液の結果とほぼ同じ傾向であることが確認出来た。

IP による PSL 値と、LSC で求めたトリチウムの放射能量(Bq)の比較では、深度方向への傾向に明らかな差違が生じているが、LSC で求めた放射能量(Bq)は、溶解時間 3 分間に溶けたア

ルミニウム中のトリチウムの総量測定であり、PSL 値は、試料表面近傍の放射線量測定であることに起因している。特に I P によるトリチウムの測定においては、平均エネルギーが 12keV (最大エネルギー 18.6keV) と低いため、例えば厚さ $17\mu\text{m}$ のアルミニウムフォイル ($4.47\text{mg}/\text{cm}^2$) でしゃへいした場合、13.2%まで減少することからしても、今回のように約 $25\mu\text{m}$ まで浸透しているトリチウムの総量を直接測定することは出来ないが、アルミニウム中の深度方向へのトリチウムの分布が一定である条件のもとでは推定が可能である。

5. 非汚染面をアクリル塗料で被覆した重水用アルミニウム配管試料の溶解実験

前項 4 のトリチウムの浸透深さを求める実験は、重水用アルミニウム配管試料が H F 溶液に對して均一に溶解していることを前提として行った。ここでは、H F 溶液に對して溶解しにくい塗料を塗布し、溶解を配管内面の汚染面のみとすることにより、より正確な浸透深さを求める実験を行った。

5. 1 試料の作成

実験は、アルミニウムブロック及び重水用アルミニウム配管にアクリル塗料を塗布し行った。その試料を、Table 7、Fig.11 及び Photo. 7 に示す。

① 耐浸食試験用アルミニウム

耐浸食試験用アルミニウムは円柱ブロック ($20^{\phi}\times13^{\text{mm L}}$) で、アクリル塗料を 2 回塗りした。試料形状は Fig.11 の通りである。

② 重水用アルミニウム配管

重水用アルミニウム配管は、10 インチ管の一部の切片 ($30^{\text{W}}\times15^{\text{H}}\times10^{\text{mm t}}$) 2 個で、配管内面 (汚染面) を除く 5 面にアクリル塗料を 2 回塗りした。試料 No. は Al-4 及び Al-5 とした。それぞれの試料形状は Fig.11 の通りである。

5. 2 アクリル塗料の 1.5% (1.21M) H F 溶液に対する耐浸食試験

前項①の試料及び未塗布の円柱ブロックについて、H F 溶液に對する耐浸食試験を行った。それぞれの試料を、1.5% (1.21M) H F 溶液に 1 時間浸け、前後の重量変化により耐浸食性を求めた。その結果を Table 8 に示す。未塗布の試料は $7.66\text{mg}/\text{cm}^2$ の重量減で、深度方向厚さで $28.3\mu\text{m}$ 溶解した。一方の塗料を塗布した試料は、重量減が 0.33 mg とほとんど溶解せず、塗布面の状態も目視では変わらず、剥離等の変形は見られなかった。以上のことから、今回使用したアクリル塗料は、本実験の目的に十分耐えるものであることを確認した。

5. 3 1.5% (1.21M) H F 溶液による重水用アルミニウム配管 (Al-5) 溶解実験

Al-5 試料を用いて溶解実験を行った。その結果を Table 9 及び Fig.12~14 に示す。また、各バッチ毎の I P による放射線強度測定結果を Photo. 8 に示す。

4. 2 項との比較では I P による測定結果がほぼ B G となるまでの時間に約 2 倍と大きな差がでたものの、深度方向ではほぼ同じ結果となった。この原因として、発泡条件の違いが考えられた。前回 4. 2 の実験では、1 回目から非汚染面の発泡があったが、今回の実験では汚染面の

酸化被膜が少なくなったと思われる 21 分頃からであった。アルミニウムの HF 溶液による発泡は激しいものがあり、この激しい発泡による攪拌状態が強固な酸化被膜を強引に溶かしているものと考えられる。深度方向への結果としては、約 $25 \mu\text{m}$ でほぼ同じ値となった。前回の実験では、結果的には汚染面も含めて全体としてほぼ均一に溶けていたものと考えられる。しかし、今回の酸化被膜面のみの溶解実験により、深度方向への浸透深さの結果がより信頼性の高いものとなつた。

なお、 ^{60}Co の深度方向への測定結果は、約 $8 \mu\text{m}$ で前回の結果とほぼ同じ結果であった。

5. 4 1.5% (1.21M) HF 溶液中のトリチウム量の測定

前項 5. 3 の実験で使用した 1.5% (1.21M) 溶液中のトリチウム量を、LSC を用いて測定した。各バッチ毎に使用した HF 溶液 30 ml の中から 2 ml を分取し測定試料とした。測定条件は 4. 3 の実験と同じとした。測定結果を Fig.15 に示す。

溶解実験の結果、最初の 3 分で 62%、次の 3 分では 26% のトリチウムが溶液中に検出された。深度方向でみれば、 $6.74 \mu\text{m}$ 以内に 88% 以上が含まれていることが確認できた。4. 3 項の実験の 2.2% HF 溶液による溶解実験の結果では $5.65 \mu\text{m}$ で 86%、1.5% では $6.13 \mu\text{m}$ で 92% のトリチウムが溶液中に検出されている。今回の結果は、全体としてほぼ同じ結果であったが、わずかながら深度方向への浸透が多い結果となつた。

5. 5 1.5% (1.21M) HF 溶液による重水用アルミニウム配管 (Al-6) の溶解速度確認実験 (アクリル塗料被覆無し)

アクリル塗料を塗布しなかった 4. 2 項の実験と、アクリル塗料を塗布した今回の 5. 3 項の比較では、溶解速度において大きな差が出たことから、アクリル塗料による被覆の有無で速度が変わるかどうかの確認実験を行つた。条件は、4. 2 項と同じくアクリル塗料を使用しない条件で行つた。Al-6 試料を用いて溶解速度について求めた結果を Fig.16 に示す。

その結果、溶解速度は Fig. 8 と同じ 20 分でほぼ 99% が溶解し、HF 溶液による溶解時の発泡が溶解速度に影響を与えていることを確認した。浸透深さも約 $25 \mu\text{m}$ とほぼ同じ結果となつた。

6. ^{60}Co 標準線源を用いた重水用アルミニウム配管中の ^{60}Co の IP への寄与の測定

γ 線測定によって検出された ^{60}Co が、IP による測定結果にどの程度寄与しているかを調べるために、標準線源を作成して IP で測定し放射能量 (Bq) と PSL 値の関係を調べた。

^{60}Co の標準溶液 $20 \mu\text{l}$ (26.7 Bq) を、マイクロピペットで分取してろ紙に吸着後乾燥させ、 γ 線測定及び IP により ^{60}Co の放射能測定を行つた。IP では、トリチウムの放射線をしゃへいするために使用したアルミニウムフォイル (18.3 mg/cm^2) の有無の両状態で測定した。その結果を Table 10 及び Photo. 9 に示した。 ^{60}Co 標準線源は、1 Bq 当たりの PSL 値は 105 で、アルミニウムフォイル有りの状態では約 10% の 11 まで減少した (20 時間測定による 3 時間換算値)。

以上の結果をもとに、試料 Al-3 及び試料 Al-5 中の ^{60}Co の PSL 値に対する寄与を求めるとき、 ^{60}Co の放射能量 6.3 Bq 及び 6.1 Bq は、661 PSL 及び 641PSL に相当し、試料の測定値 1.98

$\times 10^4$ PSL 及び 2.47×10^4 PSL の約 3.3% 及び 2.6% であった。この結果から、IP 測定値のほとんどがトリチウムであることが確認された。この寄与率の相違は、試料 Al-5 の単位面積あたり PSL 値が約 15% 高いことによるものであり、試料の保管状態が影響したものと考えられる。また、試料 (Al-3) にアルミニウムフォイル (18.3 mg/cm^2) でトリチウムの放射線をしゃへいで測定した PSL 値 158 (40 時間測定による 3 時間換算値) は、上記の ^{60}Co 標準線源の測定値から計算により求めた 70PSL の約 2 倍であった。 ^{60}Co のみの放射線であれば 70PSL に近似すると考えられ、今後の検討課題である。

なお、SUS-1 の ^{60}Co 2.5 Bq から PSL 値を推定すると 263 PSL で、測定値 526 PSL の 50% であった。

7. 重水用アルミニウム配管中のトリチウム量の測定

前々項の 5 で測定したトリチウムは、HF 溶液中のものであり、試料中に含まれているトリチウム量の評価が不可欠である。その為、Fig.17 に示すトリチウム捕集装置を製作し、アルミニウム重水配管に含まれるトリチウムの全量の評価と同時に、酸化剤 (ホプカライト) の前後の捕集剤 (過塩素酸マグネシウム) に捕集されたトリチウム量を測定することにより、加熱放出時の HTO 等に代表される水成分と HT に代表されるガス成分の比率を求める実験を行った。試料は、Al-3 の試料を 2 分割し、Al-3A 及び Al-3B とした。それぞれの寸法を Fig.18 に示す。この 2 つの試料を用いて、アルミニウムの融点 (664°C) 以下と以上の温度について放出実験を実施した。

トリチウム捕集装置のトリチウム捕集材 (過塩素酸マグネシウム) は、内径 6mm φ の石英管に長さ約 100mm 詰めて捕集管とした。酸化剤 (ホプカライト) は、捕集管同様内径 6mm φ の石英管に長さ約 100mm 詰めて酸化管とし、温度は 200°C に設定した。

アルミニウムの融点以下の温度で加熱して放出されるトリチウムを求める実験として、重水用アルミニウム配管 (Al-3B) を酸化炉内に挿入し、温度を 550°C に設定して 100 分加熱した。試料を冷却後取り出し、IP による放射能測定を実施した。その結果 906 PSL (16 時間測定による 3 時間換算値) であり、試料中の ^{60}Co 約 2.4Bq (Al-3B の PSL 値から推定) からの PSL の推定値約 250 をおおよそ 650 上回る値であった。そのため、600°C で 100 分再加熱し、再度 IP による測定を行った。その結果、PSL 値はほとんど変わらず 931 (Photo.10 参照) であり、溶融点以下においては放出可能なトリチウムは、550°C で 100 分加熱においてほとんど放出され、再加熱により残っているトリチウムはほとんど放出されないことがわかった。そこで、放出されずに残っているトリチウム量を確認するためこの試料を、1.5% (1.21M) HF 溶液 30ml に 40 分間つけてトリチウム吸着層を溶解し、その溶液 1ml を LSC で測定した。

トリチウム捕集材は、再加熱後に回収して水 50ml に溶解し、そのうち 1ml を LSC による測定試料とした。また、最後の水トラップ溶液 30ml を回収して洗浄液を合わせ合計 50ml に薄め、1ml を LSC の測定試料とした。

アルミニウムを融点以上に加熱して放出されるトリチウムを求める実験として、重水用アルミニウム配管 (Al-3A) を酸化炉内に挿入し、温度を 690°C に設定して 100 分加熱した。試料を冷却後取り出し、IP による放射能測定を実施した結果、ほとんど検出されなかった (Photo.10

参照)。トリチウム捕集剤は 50ml の蒸留水で溶解し、最後の水トラップ溶液は希釈して 50ml とし、それぞれ 1 ml を LSC の測定試料とした。

その後、重水用アルミニウム配管 (Al-3A 及び Al-3B) を 1.5% (1.21M) HF 溶液 30ml に 40 分間つけてトリチウム吸着層を溶解し、それぞれの溶解液 1 ml を LSC の測定試料とした。重水用アルミニウム配管 (Al-3A 及び Al-3B) は、乾燥後 IP により放射能測定を実施した。その結果放射能は検出されなかった (Photo.10 参照)。

LSC による測定結果を Table11 に示す。融点以下および以上の実験結果は、全体としてほぼ同じ結果となった。融点以下の実験で放出されたトリチウムの量は 4010 Bq/cm^2 であり、酸化剤前後の分配率を合わせると 99.6% が放出されていることが確認された。IP による測定結果から見ても、最初の 550°C の加熱でとほとんど放出されたものと考えられる。また、融点以上の実験においても、放出されたトリチウムの量は 4040 Bq/cm^2 で融点以下の実験結果と良く合い、酸化剤前後のトリチウムの分配率も 99.7% で融点以下の加熱と良く一致した。酸化剤後の分配率が 0.1% であることから、放出されたトリチウムの化学形がほとんど水成分であることを確認した。

最後に、今回の測定試料についてみれば、融点以下の実験での 1 PSL 当たりの Bq 値は 0.73、融点以上の実験での 1 PSL 当たりの Bq 値は 0.71 であった。同じ経歴の重水用アルミニウム配管であれば、IP で測定することにより簡易にトリチウム量を推定する方法が確立できた。

8. 結論

以上の実験から以下のことを確認した。

- 1) 重水用配管の種類によるトリチウムの吸着について、ステンレス管にはほとんど浸透していないが、アルミニウム管は 1 cm^2 当たり $4.00 \times 10^3 \text{ Bq}$ 吸着していることを確認した。このときの IP による測定値は $5.80 \times 10^3 \text{ PSL/cm}^2$ であり、1 PSL あたり 0.7 Bq に相当することを確認した。この結果から、重水用アルミニウム配管を IP で測定することにより、配管中に含まれるトリチウム量の推定を簡易に行うことが可能となった。
- 2) アクリル塗料は、1.5% フッ化水素酸溶液に対して耐性があることを確認した。このアクリル塗料を重水用アルミニウム配管の非汚染面に塗布し、1.5% フッ化水素酸で溶解して求めたトリチウムの浸透深さは $25 \mu\text{m}$ であり、その約 90% は $6.8 \mu\text{m}$ 内に存在することを確認した。
- また、アクリル塗料を塗布した時の酸化被膜の溶解速度は、塗布しないときに比べ約 2 倍遅かった。その原因是、溶解時の発泡条件であることを確認した。
- 3) 重水用アルミニウム配管中のトリチウムは、 690°C の温度で 100 分間加熱することにより、99% 以上が放出されることを確認した。また、このとき放出されるトリチウムの化学形は、その 99% 以上が水成分の形であることを確認した。
- 4) アルミニウム配管に付着・浸透した ^{60}Co の PSL への影響は 3 % 程度であることを確認した。

今回の実験から、重水用アルミニウム配管の非汚染面にアクリル塗料を塗布し、フッ化水素酸により汚染面のみを一定時間浸けることにより溶解すれば、比較的容易に配管中のトリチ

ウムを除去できることが分かった。今後この溶解液の処理を検討することにより、アルミニウム配管の廃棄物処理方法の1つとして考えることが出来る。

また、約6ヶ月間の実験期間中においても、重水用アルミニウム配管試料について顕著なPSL値の低下は見られず、トリチウムが比較的安定した形で試料中の酸化被膜中に存在していることが確認された。この重水用アルミニウム配管を乾燥空気状態で管理した場合、空气中へのトリチウムの放出が無視できるものであるならば、それも廃棄物処理方法の1つとして考えることが出来る。

今後、これらについて検討を加える予定である。

謝辞

今回の実験を進めるにあたり、重水用配管試料の調整と提供及び関連情報の提供について、多大な御支援を頂いたバックエンド技術部原子炉解体技術課長番場正男氏及び岸本克己氏に深く感謝する。実験を進める中で、アルミニウム酸化被膜の溶解方法について助言を頂いた照沼久寿男氏（現放射線振興協会）、トリチウム放出実験及び装置の製作について助言・御協力を頂いた研究開発課総括主査加藤岑生氏及び副主任研究員須貝宏行氏、トリチウムの液体シンチレーションカウンターによる測定で多大な御援助を頂いた大洗研究所管理部放射線管理課辻元隆幸氏に深く感謝する。

参考文献

- 1) 研究炉部 ; “JAERI-Review 99-032, 平成10年度研究炉部年報(運転・利用と研究・技術開発)”, p176, (2000)
- 2) 小林勝利 ; 羽鳥晶子 ; “Isotope News” 2, p12, (1998)
- 3) 森啓司 ; RADIOAISOTOPES, 48, p53, (1999)
- 4) 森啓司 ; RADIOAISOTOPES, 48, p60, (1999)
- 5) 久保亮五 ; 長倉三郎 ; 井口洋夫 ; 江沢洋 ; 理化学事典, (第4版), p50, (1989)

Table 1 Dimensions of stainless steel pipe samples

Sample No.	Size (mm)	Surface area (mm ²)	Weight (g)
SUS-1	98.3L × 11.5W × 3.0T	1130.5	24.8885
SUS-2	O.D.34.4φ × I.D.28.2φ × 17.4L	1540.7	39.7779

Table 2 Dimensions of aluminum pipe samples

Sample No.	Size (mm)	Measuring area (mm ²)	Surface area (mm ²)	Weight (g)
Al-1	Fig.1 reference	199.1	1155.5	6.1225
Al-2		185.3	1014.1	4.4398
Al-3		315.8	1412.9	8.2039

Table 3 Activity and dose measured for aluminum and stainless steel pipe

Sample No.	Activity of ⁶⁰ Co (Bq)	Dose (PSL)
SUS-1	2.5	418
SUS-2	6.9	521
Al-1	4.5 *	13999
Al-2	3.6 *	11328
Al-3	6.3	19808

* : Activities (Bq) values of Al-1 and Al-2 estimated from PSL value of Al-3

Table 4 Dissolving of aluminum pipe for primary heavy water coolant (Al-1) by 1M NaOH solution

Dissolution time (min)	Dose (PSL)	Decrease rate (%)	Weight (g)	Dissolution quantity	
				(g)	(μm)
0	13999	100.0	6.12247	0.00000	0.00
5	14240	101.7	↓		
15	14262	101.9	6.09723	0.02524	8.10
30	14176	101.3	↓		
45	13917	99.4	↓		
60	13868	99.1	6.02297	0.07426	23.80
75	13492	96.4	↓		
105	13275	94.8	5.95069	0.07228	23.20

Table 5 Dissolving of aluminum pipe for primary heavy water coolant (Al-1) by 2.2% HF solution

Dissolution time (min)	Dose (PSL)	Decrease rate (%)	Weight (g)	Dissolution quantity	
				(g)	(μm)
0	13275	100.0	5.95069	0.00000	0.00
3	7175	54.0	5.93308	0.01761	5.65
6	3909	29.4	5.92105	0.01203	3.86
9	1042	7.8	5.90873	0.01232	3.96
12	170	1.3	5.89399	0.01474	4.73
15	48	0.4	5.87486	0.01913	6.14

**Table 6 Dissolving of aluminum pipe for primary heavy water coolant (Al-2)
by 1.5%HF(1.20M) solution**

Dissolution time (min)	Dose (PSL)	Decrease rate (%)	Weight (g)	Dissolution quantity	
				(g)	(μ m)
0	11328	100.0	4.43979	0.00000	0.00
3	10055	88.8	4.43121	0.00858	3.14
6	5532	48.8	4.42304	0.00817	2.99
9	3937	34.8	4.41595	0.00709	2.59
12	2525	22.3	4.40940	0.00655	2.40
15	938	8.3	4.40272	0.00668	2.44
18	267	2.4	4.39302	0.00970	3.55
21	79	0.7	4.38357	0.00945	3.46
24	21	0.2	4.37429	0.00928	3.40
27	43	0.4	4.33643	0.01001	3.66
30	30	0.3	4.35437	0.00991	3.63
33	31	0.3	4.34313	0.01124	4.11

Table 7 Measuring dimensions of aluminum pipe for primary heavy water coolant (Al-4,Al-5)

Sample No.	Size (mm)	measuring area (mm ²)	Weight(g)	
			Not applied	Applied
Al-4		331	9.2010	9.2921
Al-5	Refer to Fig.11	342	9.6840	9.7977

Table 8 Dissolving of the acrylic paint applied aluminium test piece by 1.5% HF(1.21M) solution

Acrylic paint	Weight before dissolving (g)	Weight after dissolving (g)	Weight decrease (mg)	Surface area (cm ²)	Dissolving thickness (μm)
non applied	11.00114	10.89041	110.65	14.4644	28.30*
applied	11.11185	11.11152	0.33		—

* : Density of aluminium = 2.70 g/cm²

**Table 9 Dissolving of aluminum pipe for primary heavy water coolant (Al-5)
by 1.5%HF(1.21M) solution**

Dissolution time (min)	Dose (PSL)	Decrease rate (%)	Activity of ⁶⁰ Co (Bq)	Dissolution quantity	
				(g)	(μm)
0	24662	100.0	6.13	0.00000	0.00
3	22676	91.9	4.37	0.00324	3.52
6	16051	65.1	0.72	0.00297	3.22
9	14292	58.0	ND	0.00043	0.47
12	13031	52.8	ND	0.00013	0.14
15	11285	45.8		0.00056	0.61
18	8694	35.3		0.00063	0.68
21	5675	23.0		0.00106	1.15
24	3043	12.3		0.00142	1.54
27	1661	6.7		0.00210	2.28
30	792	3.2		0.00264	2.87
33	425	1.7		0.00239	2.59
36	268	1.1		0.00266	2.89
39	149	0.6		0.00217	2.36
42	125	0.5		0.00179	1.94
45	88	0.4		0.00268	2.91
48	48	0.2		0.00263	2.86
51	47	0.2		0.00237	2.65

Table 10 Influence of contribution of ^{60}Co to PSL in aluminum pipe for primary heavy water coolant by using a ^{60}Co standard source

Nuclide	Sample No.	Activity of ^{60}Co (Bq)	Dose (PSL)		
			Shield plate (Al foil*)		Attenuation rate
			Without	With	
^{60}Co	std.	26.7	2806	281	0.100
	Al-3	6.63	697	70	

* : Al foil = 18.26 mg/cm²

PSL value of Al-3 sample (normalized 3 hour) shielded by aluminum foil = 158

Table 11 Tritium release from aluminum pipe for primary heavy water coolant

Sample No.	Release temperature time	Tritium collector		Water trap (Bq)	1.5%HF solution (Bq)	Total activity (Bq)	Bq/cm ² ($\times 10^3$)	PSL/cm ² * ($\times 10^3$)	Bq/PSL
		Collector 1 (Bq)	Collector 2 (Bq)						
Al-3B	550°C 100min	6180	7	0	23	6210	4.01	5.49	0.73
	600°C 100min								
	Ratio(%)	99.5	0.1	0	0.4	100	—	—	—
Al-3A	690°C 100min	4990	4	0	15	5009	4.02	5.72	0.71
	Ratio(%)	99.6	0.1	0	0.3	100	—	—	—

* : The value which decreased influence of ^{60}Co (3.3%)

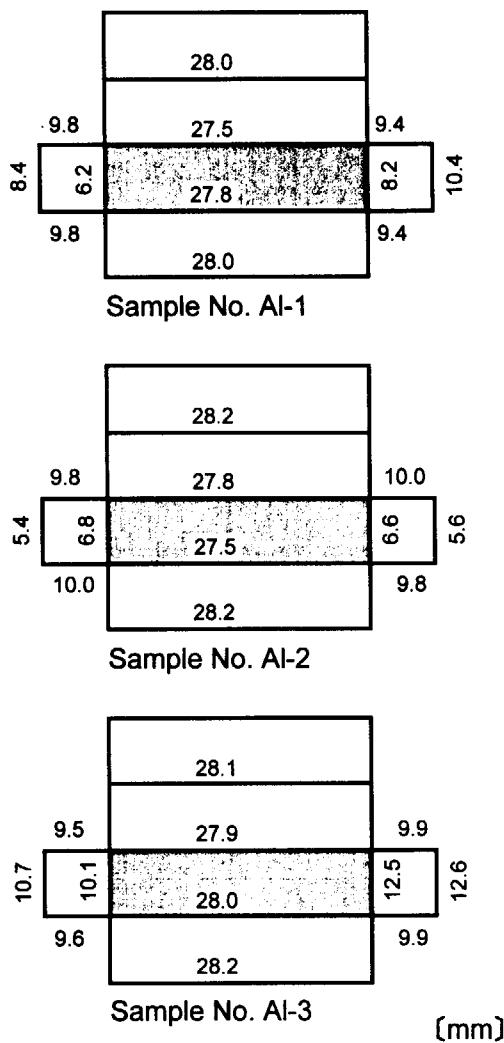


Fig.1 Measured dimensions of aluminum pipes

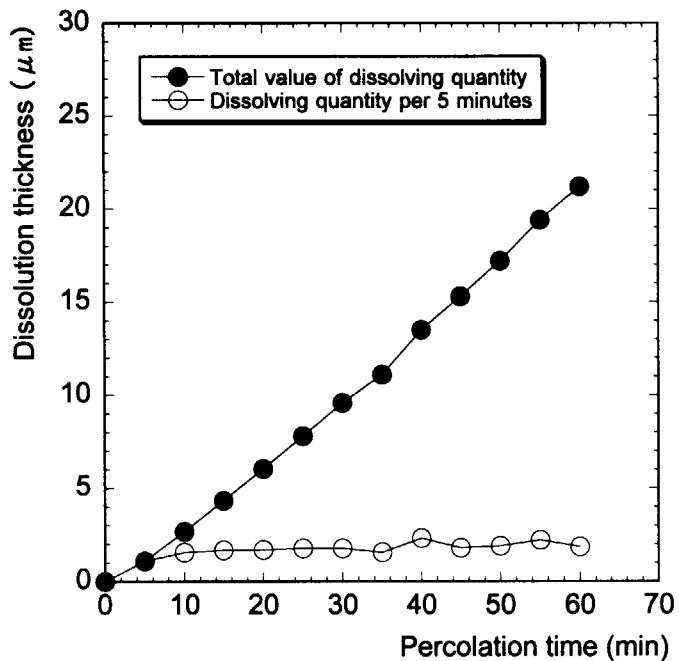


Fig.2 Dissolving of aluminum piece by 1M NaOH solution

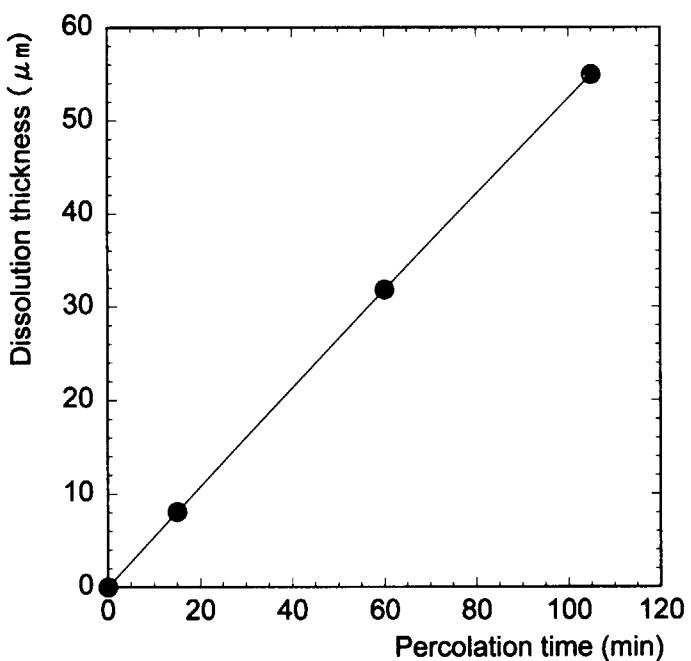


Fig.3 Dissolving of aluminum pipe for heavy water coolant (Al-1) by 1M NaOH solution

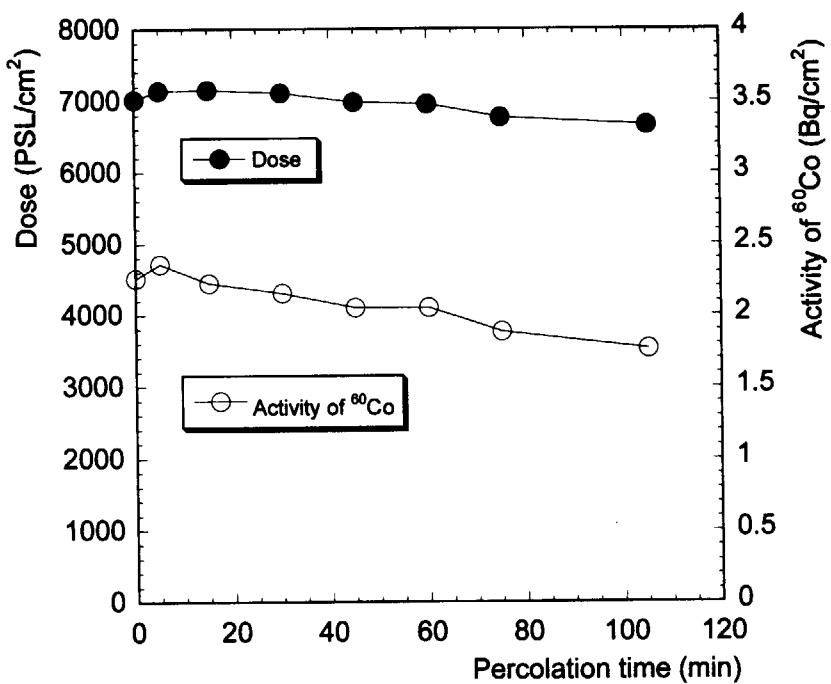


Fig.4 Dose measuring results of aluminum pipe for heavy water coolant(A-1) dissolved by 1M NaOH solution

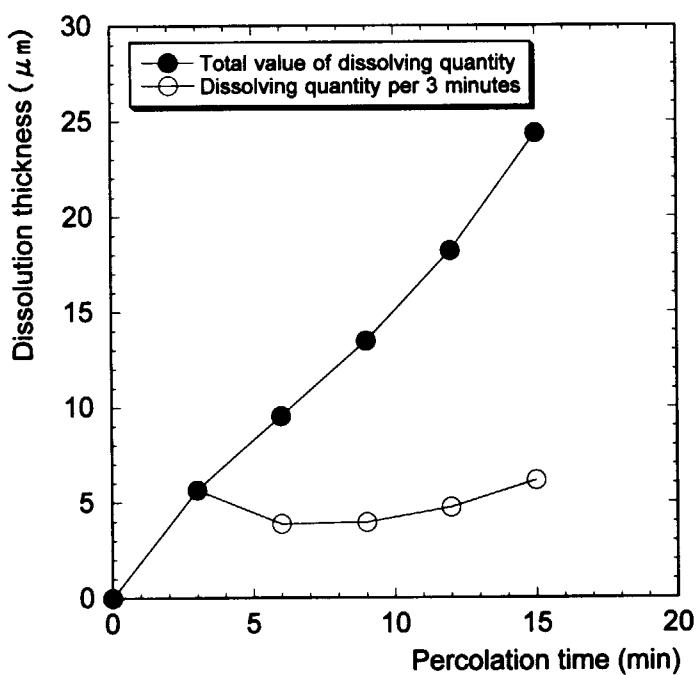


Fig.5 Dissolving of alminium pipe for heavy water coolant (Al-1) by 2.2%HF solution

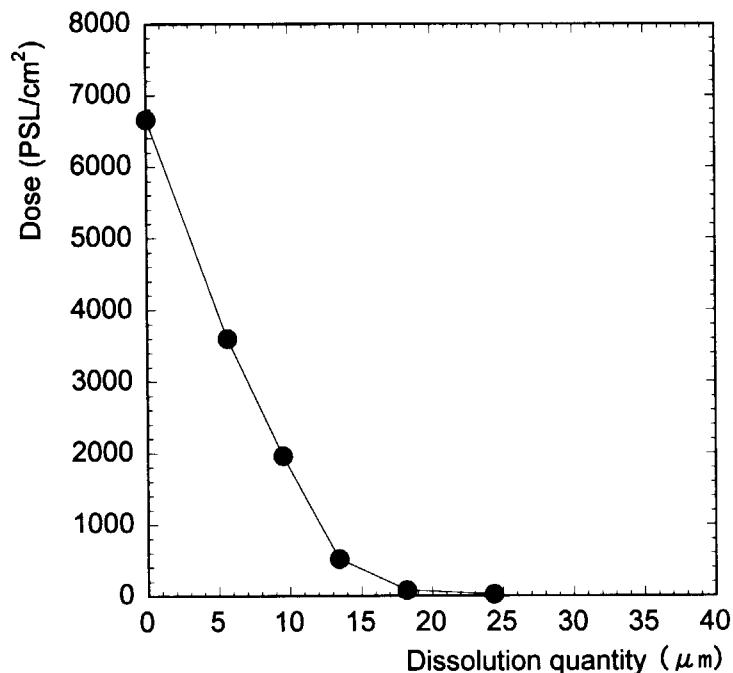


Fig.6 Dose measuring results of aluminum pipe for heavy water coolant(Al-1) dissolved by 2.2%HF solution using IP

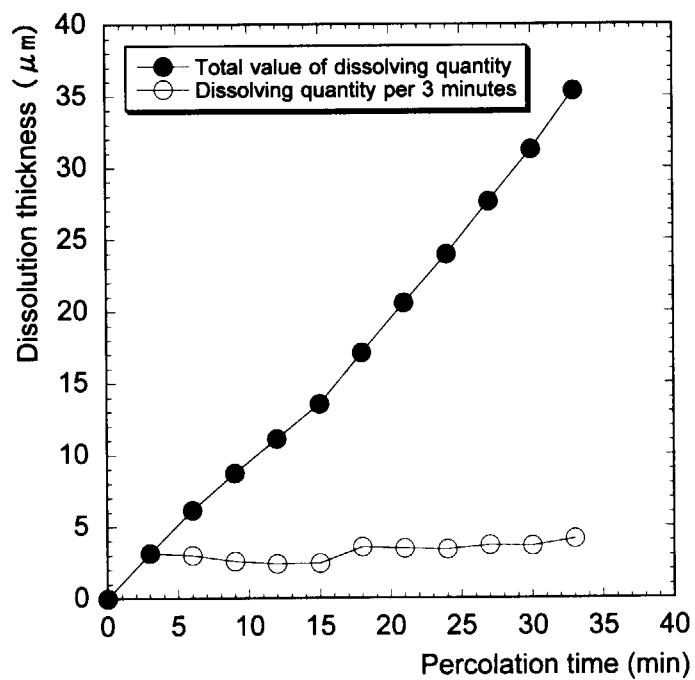


Fig.7 Dissolving of aluminum pipe for heavy water coolant (Al-2) by 1.5%HF(1.20M) solution

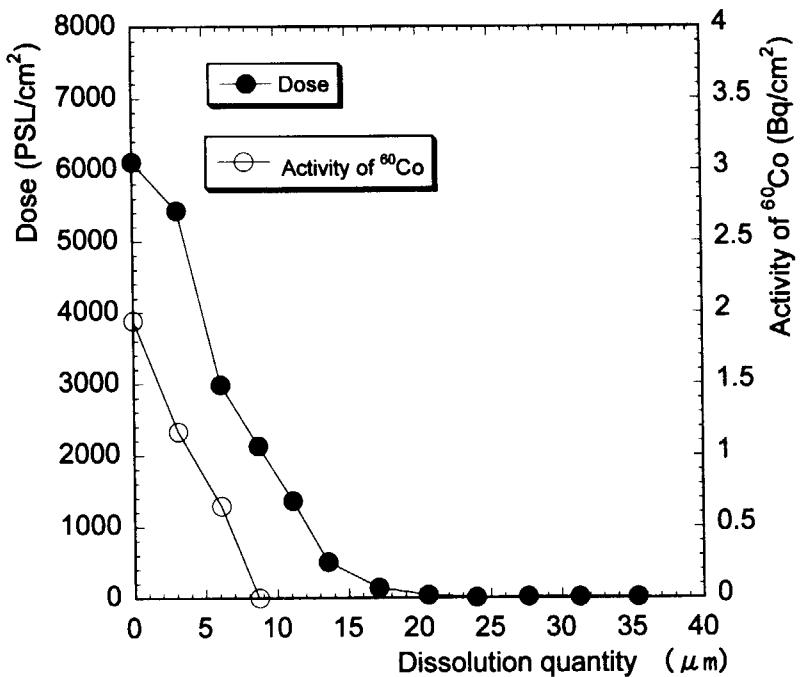


Fig.8 Dose measuring results of aluminum pipe for primary heavy water coolant(Al-2) dissolved by 1.5%HF(1.20M) solution measured with IP

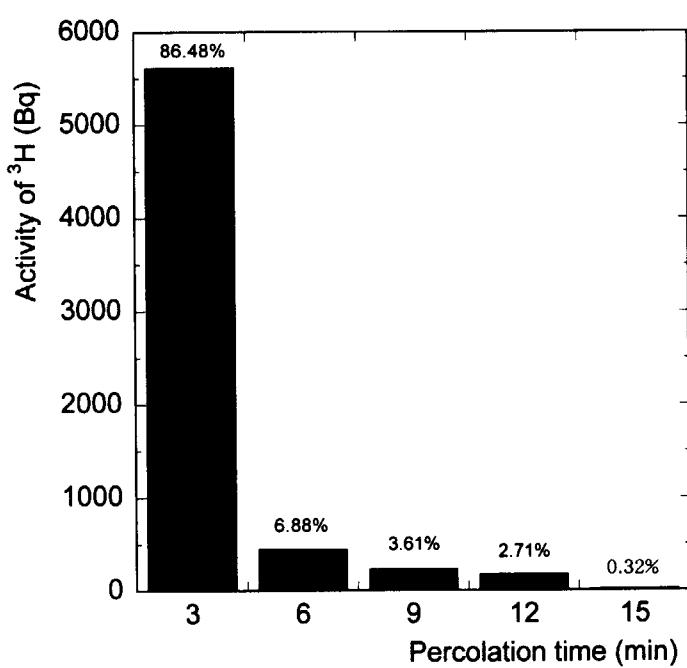


Fig.9 Tritium activity in 2.2%HF dissolving solution(Al-1)

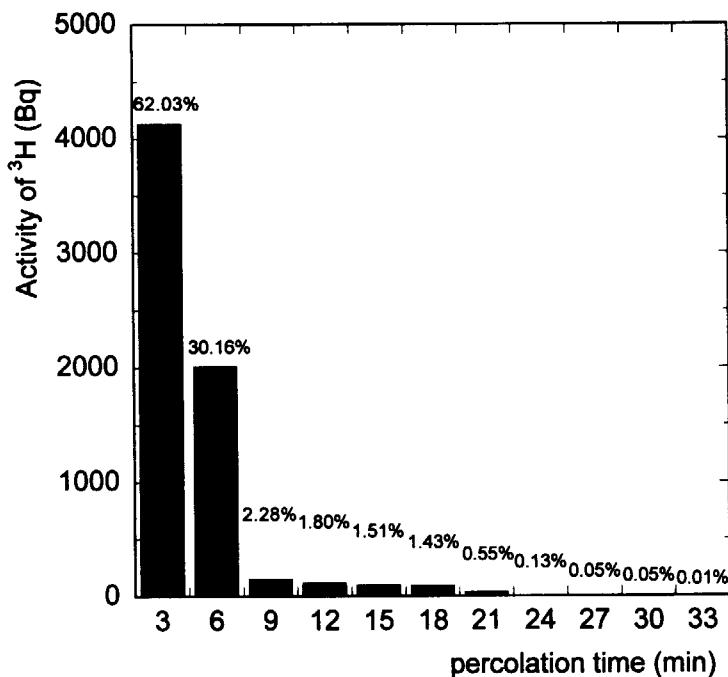


Fig.10 Tritium activity in 1.5%HF(1.20M) dissolving solution(AI-2)

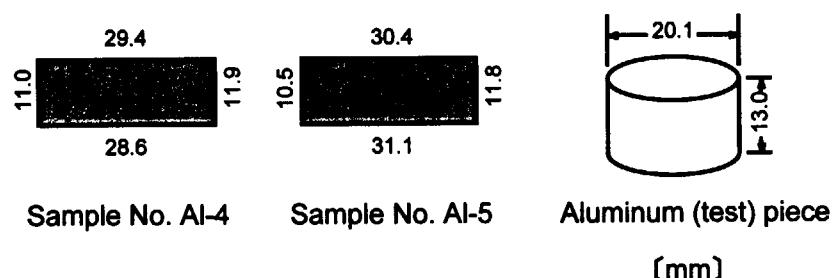


Fig.11 Measuring value of aluminum pipe for primary heavy water coolant
(AI-4 & AI-5) and aluminum test piece

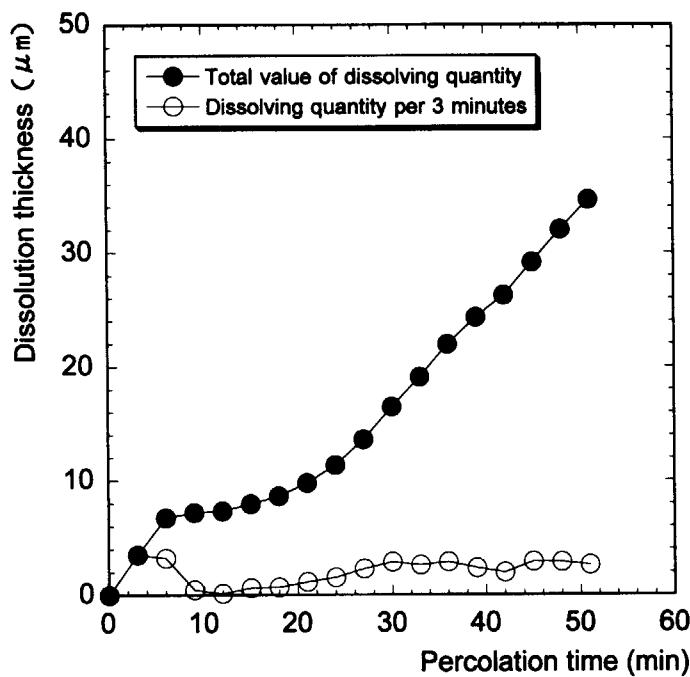


Fig.12 Dissolving of aluminum pipe for primary heavy water coolant(AI-5) by 1.5%HF(1.21M) solution

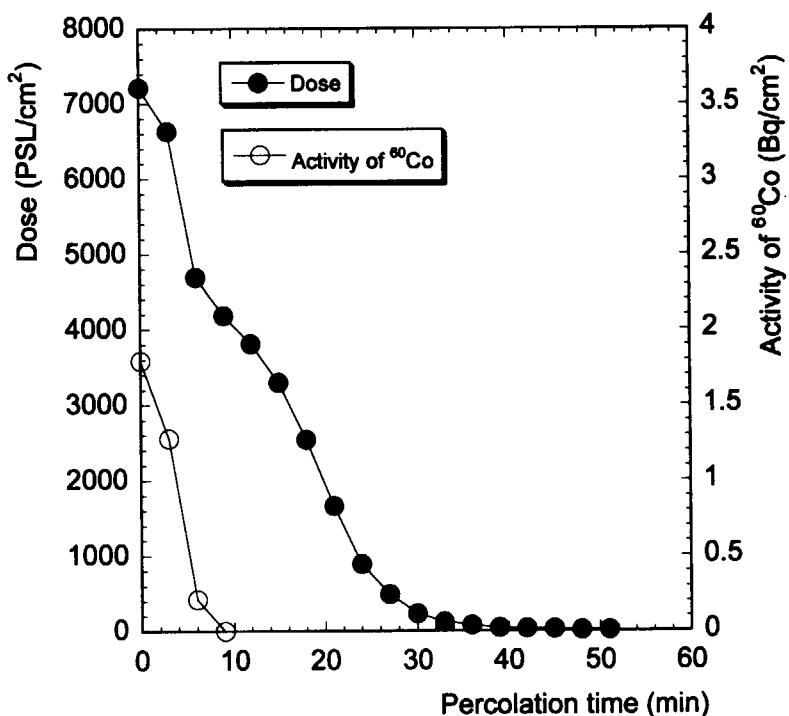


Fig.13 Dose of aluminum pipe for primary heavy water coolant (AI-5) dissolved by 1.5%HF(1.21M) solution measured with IP

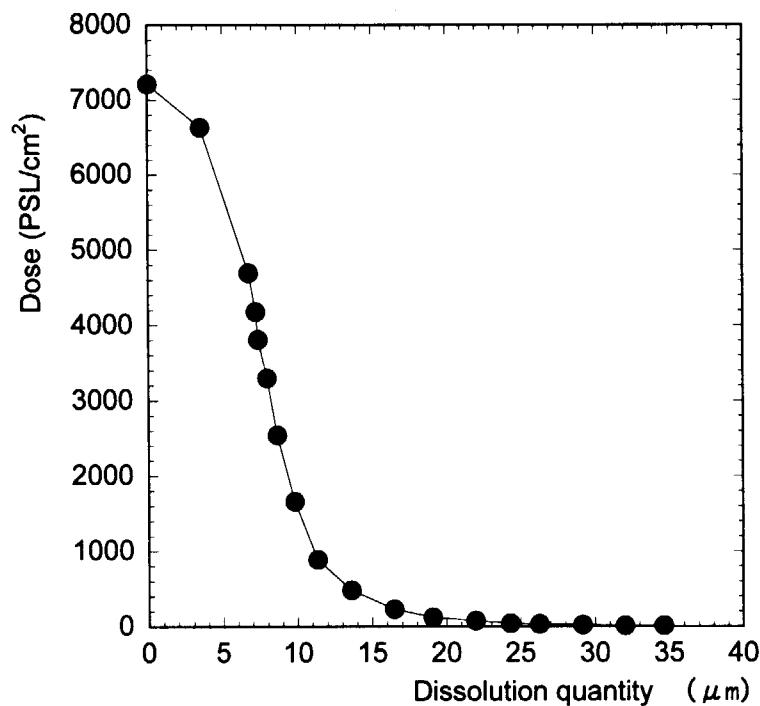


Fig.14 Dose of aluminum pipe for primary heavy water coolant (Al-5) dissolved by 1.5%HF(1.21M) solution measured with IP

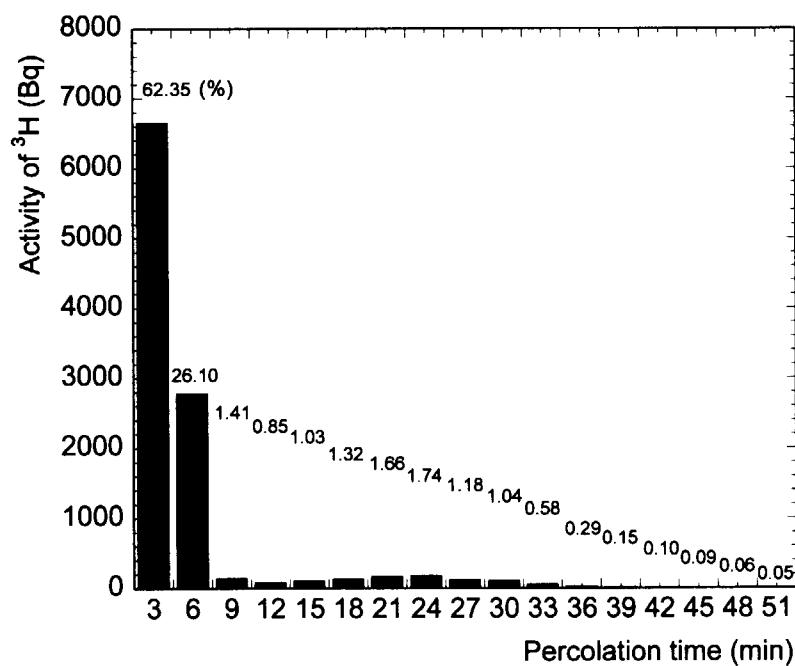


Fig.15 Tritium activity in 1.5%HF(1.21M) dissolving solution(Al-5)

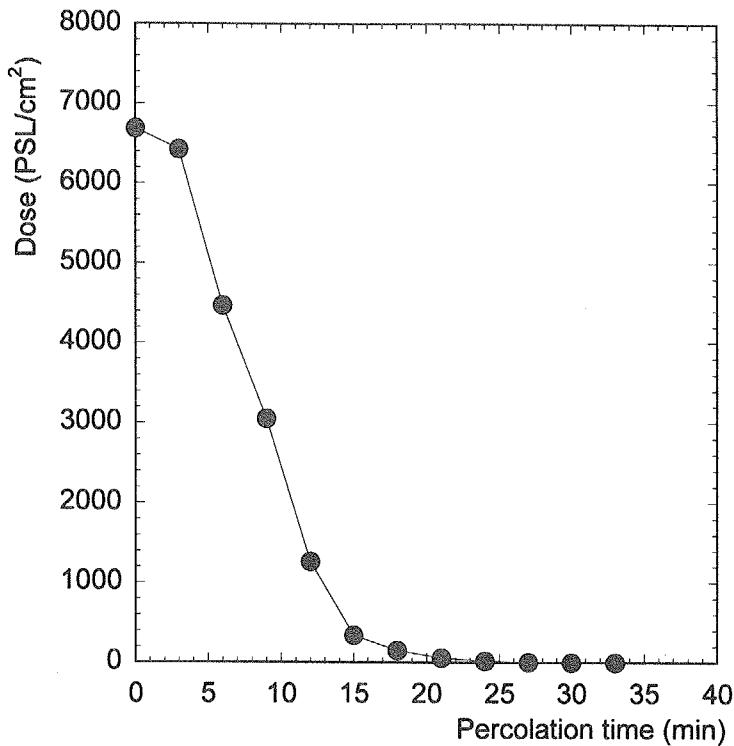


Fig.16 Dose of aluminum pipe for primary heavy water coolant (Al-6) dissolved by 1.5%HF(1.21M) solution measured with IP

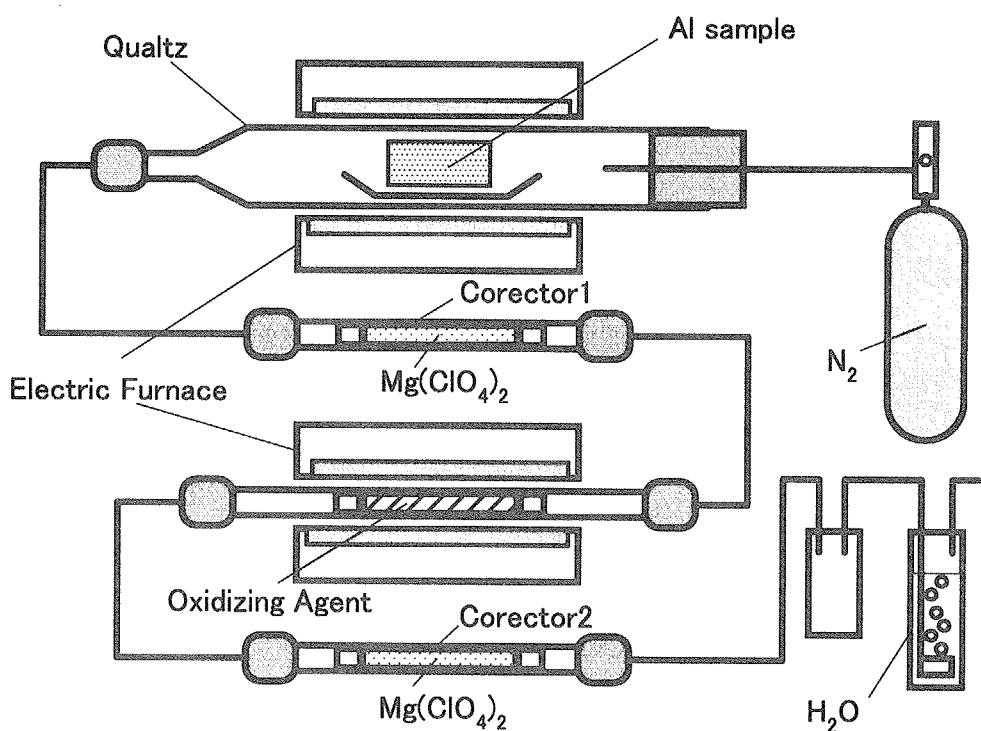


Fig.17 Experimental apparatus for collection of tritium

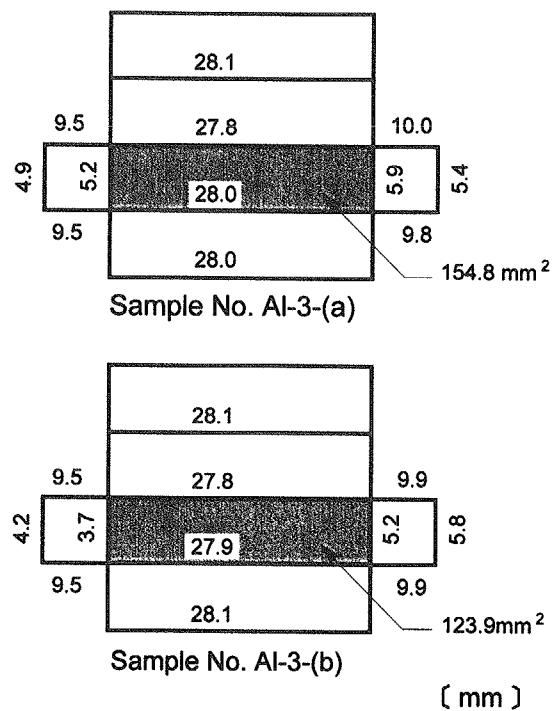


Fig.18 Measuring dimension of aluminum pipe for primary heavy water coolant

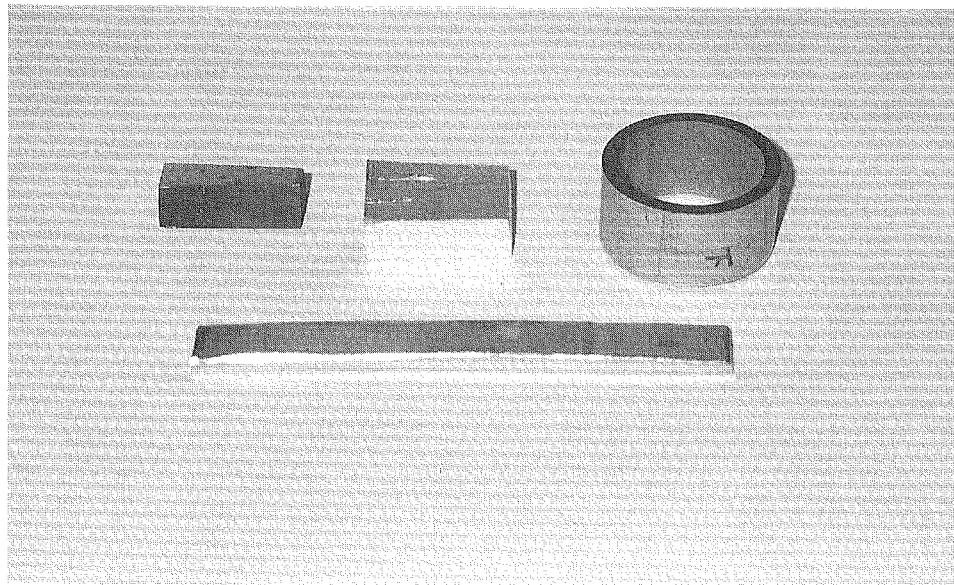


Photo.1 Stainless steel and aluminum pipe for heavy water coolant of JRR-2

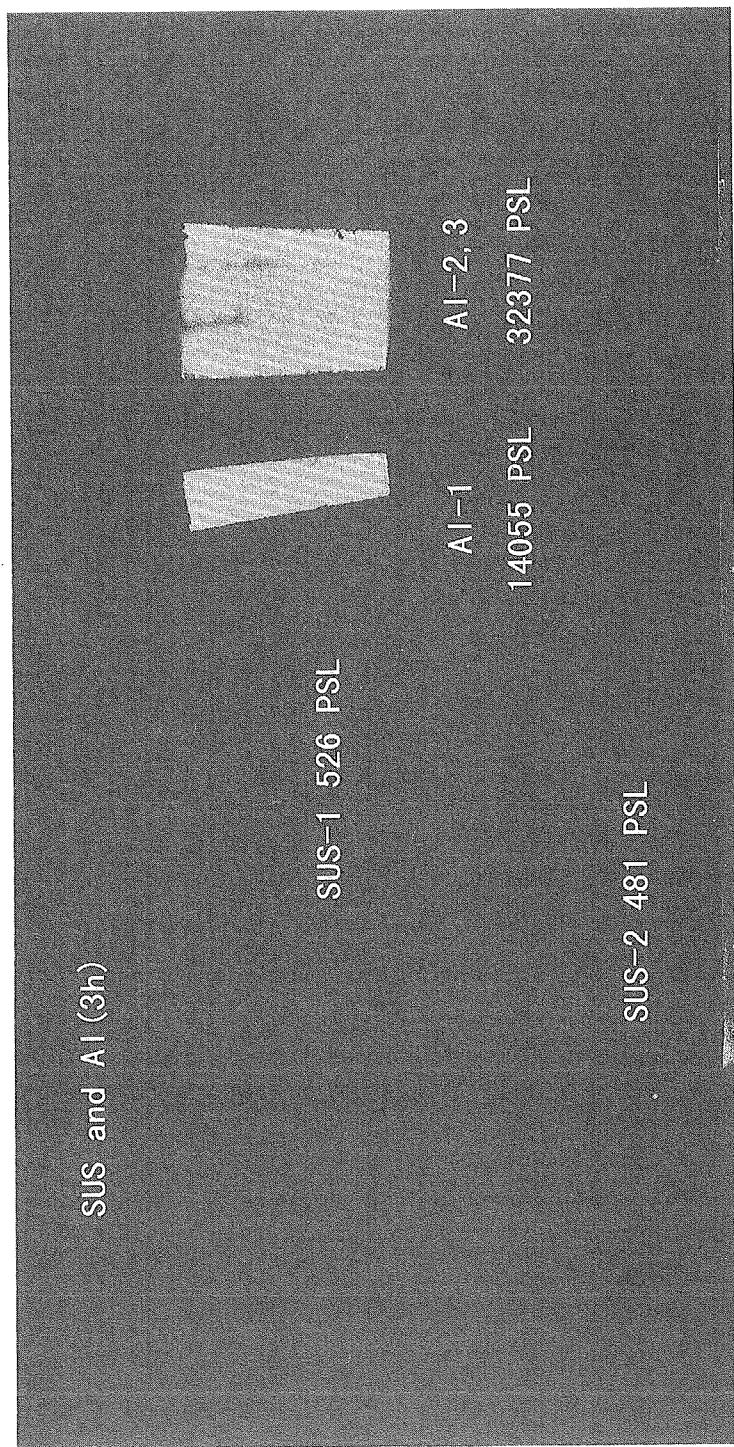


Photo.2 Dose of aluminum and stainless steel pipes measured with IP

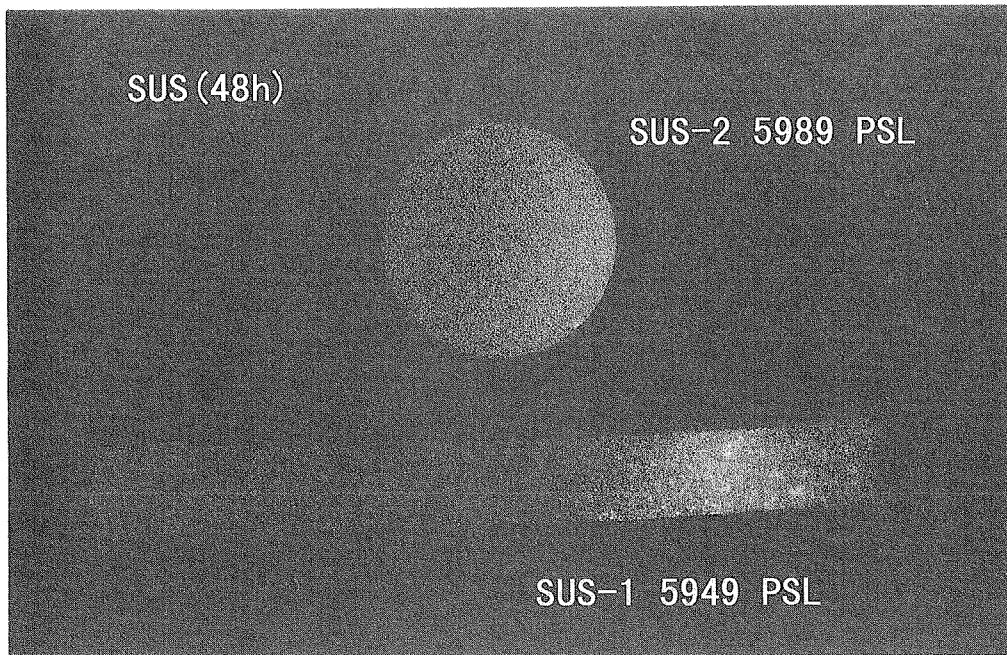


Photo.3 Dose of stainless steel pipe measured with IP (40 hour exposure)

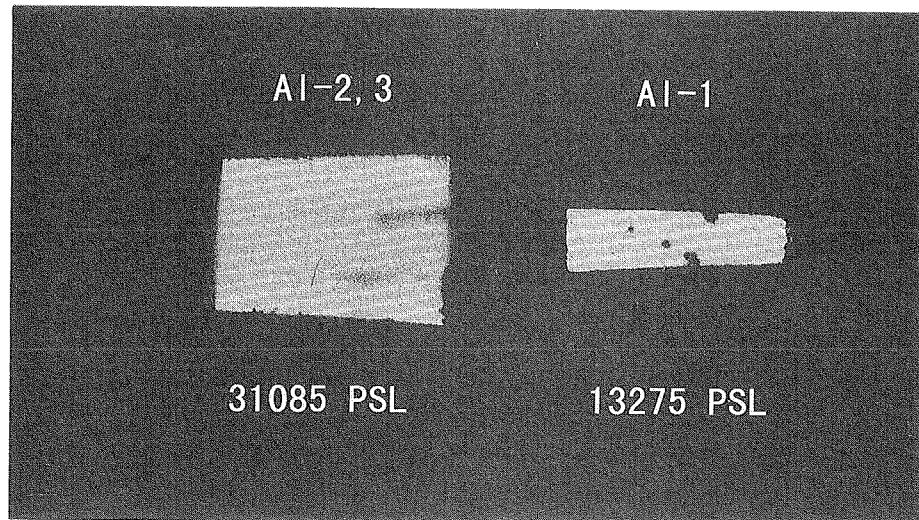


Photo.4 Dose of aluminum pipe for primary heavy water coolant (Al-1)
dissolved for 105 minutes by 1M NaOH solution using IP

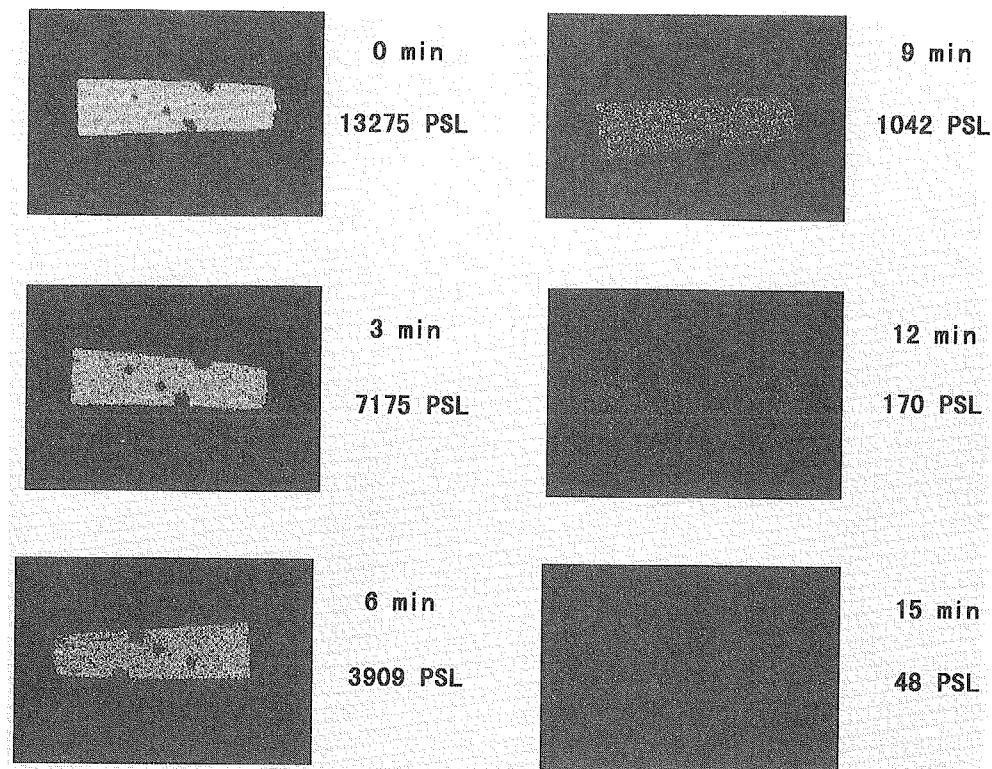


Photo.5 Dose of aluminum pipe for primary heavy water coolant (Al-1)
heating dissolved by 2.2%HF solution using IP

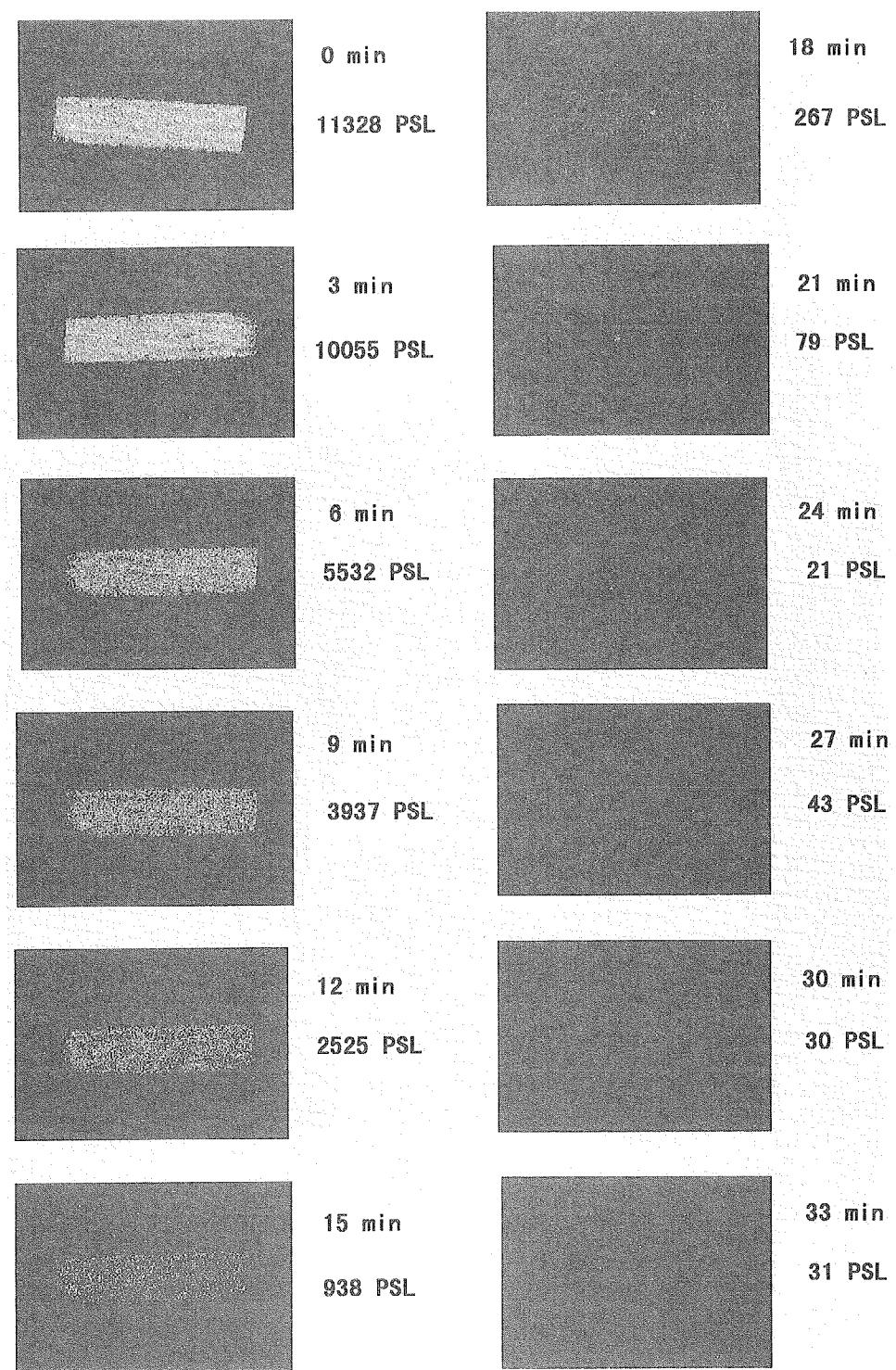


Photo.6 Dose measuring results of aluminum pipe for primary heavy water coolant (Al-2) dissolved by 1.5%HF solution using IP

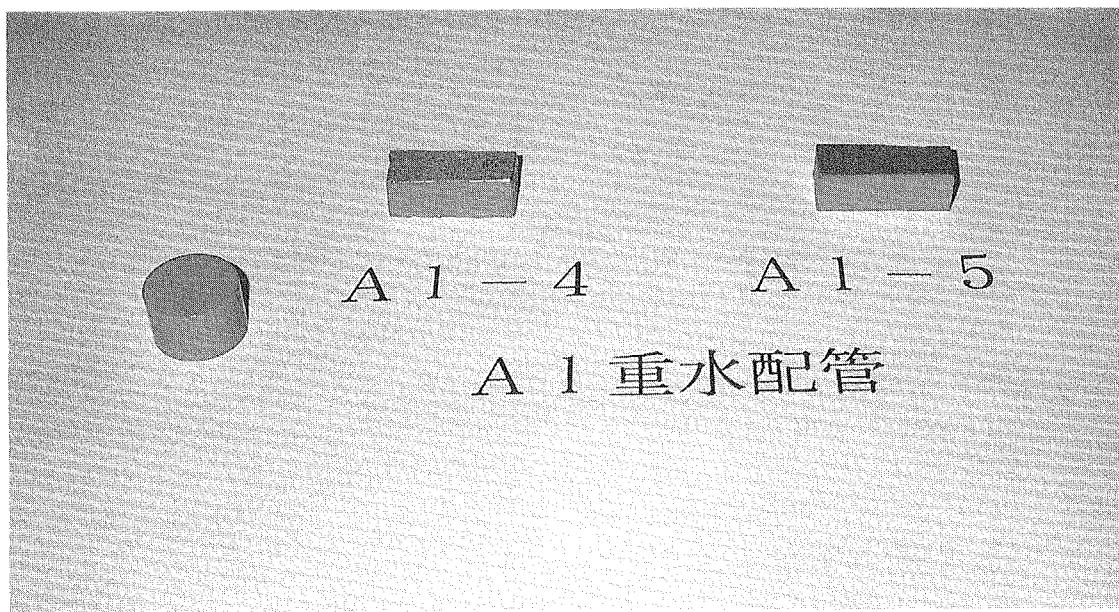


Photo.7 Aluminum pipe samples for primary heavy water coolant (Al-4&5)
and aluminum test piece

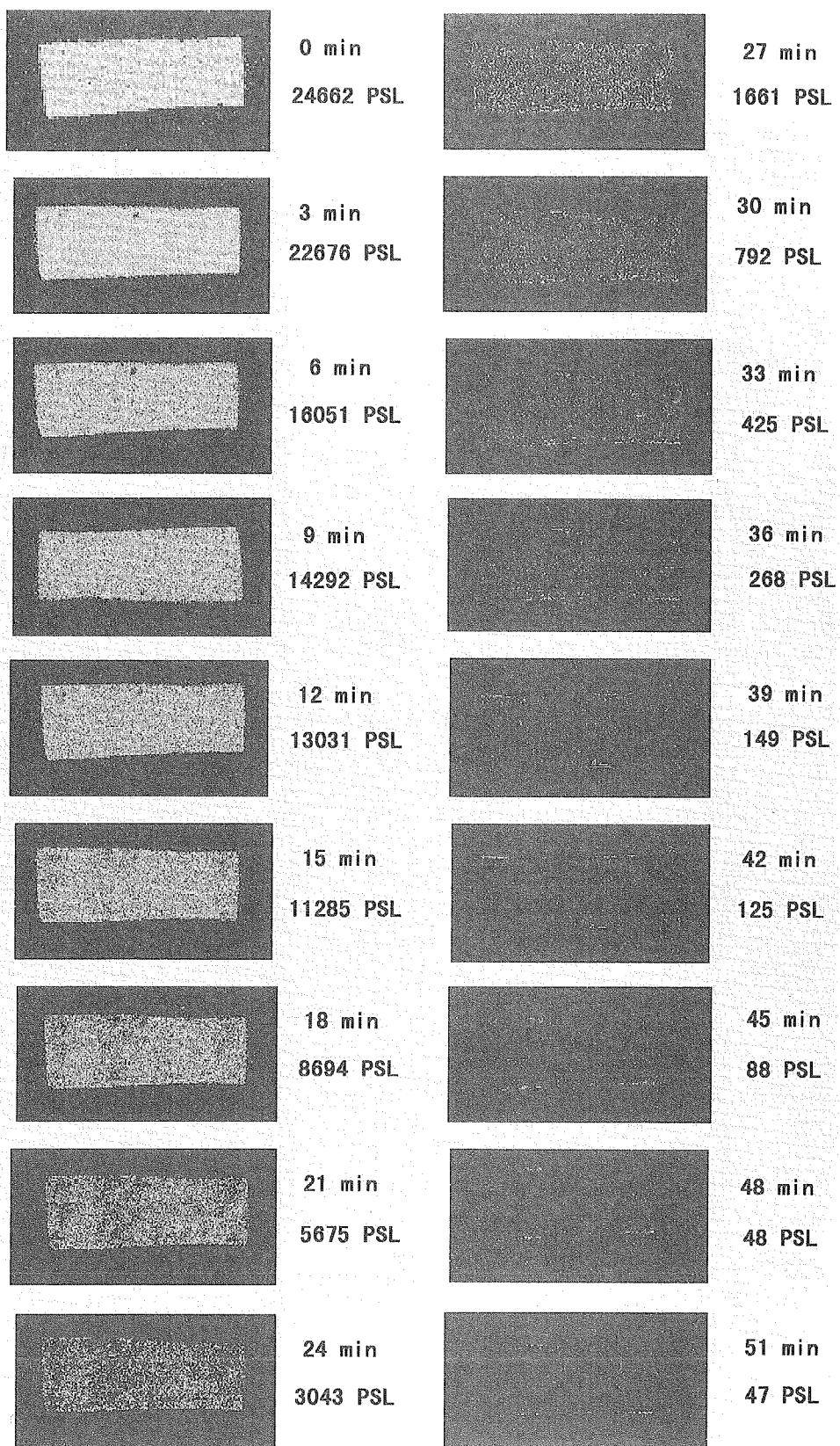


Photo.8 Dose measuring results of aluminum pipe for primary heavy water coolant (Al-5) dissolved by 1.5%HF solution using IP

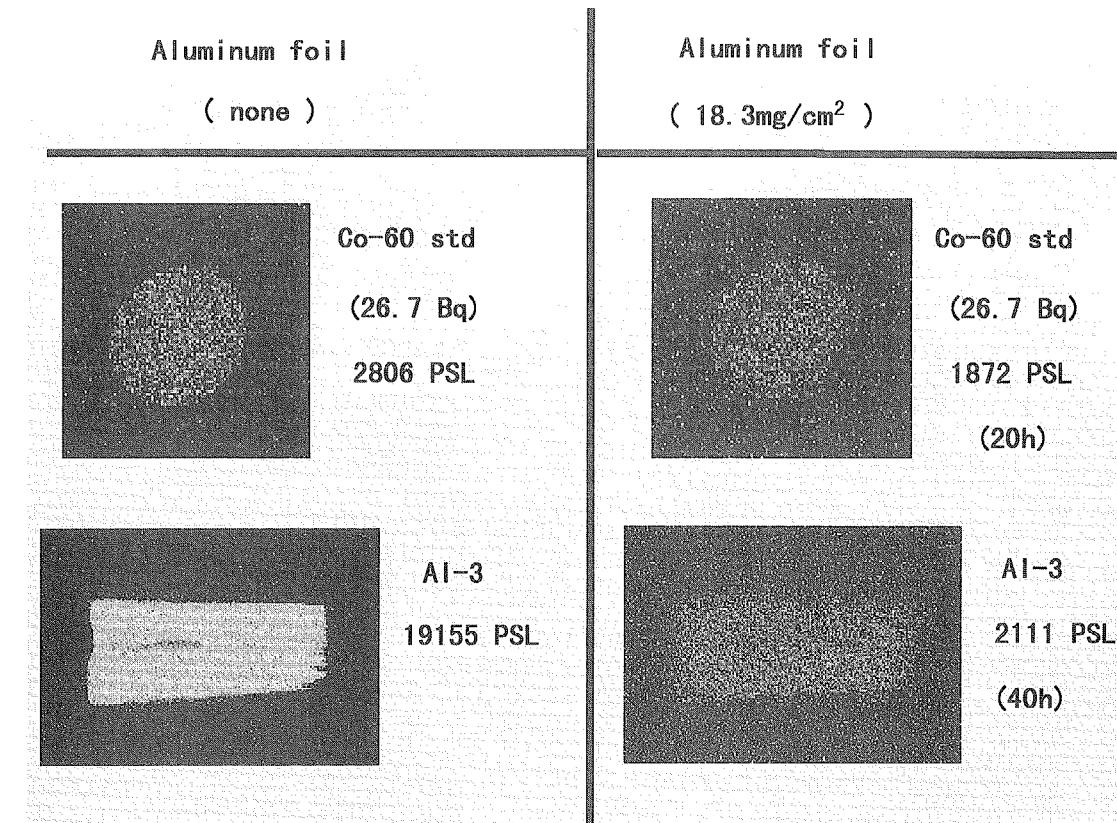


Photo.9 Dose measuring results of ^{60}Co standard source and aluminum
Pipe for primary heavy water coolant using IP

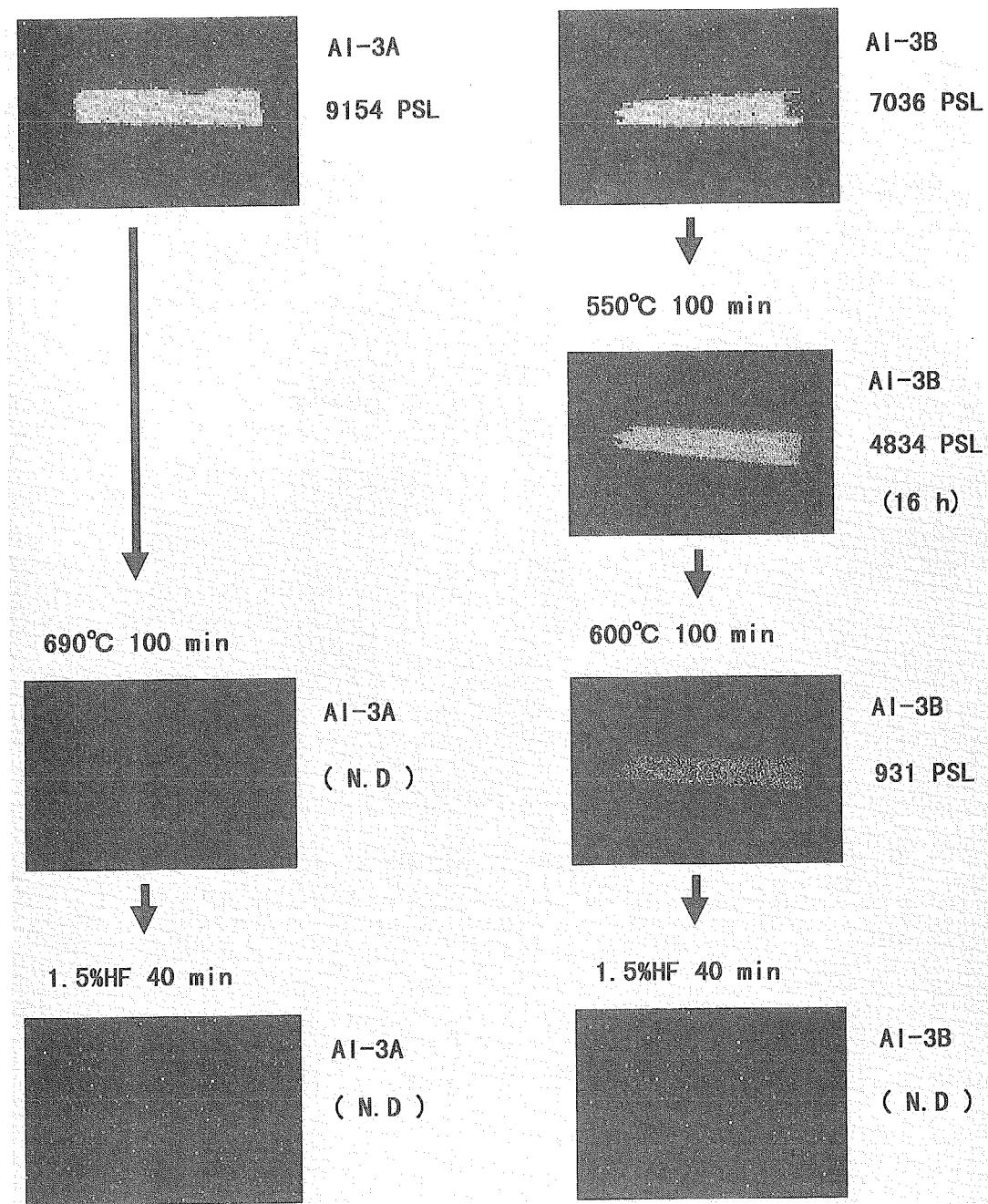


Photo.10 Dose measuring results of aluminum pipes (AI-3A,3B) for primary heavy water coolant using IP after release by heating

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
物質量	モル	mol
光强度	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
上率、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	ファラード	F	C/V
電気抵抗	オーム	Ω	V/A
コンダクタンス	ジーメンス	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	
光束度	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	t
電子ボルト	eV
原子質量単位	u

$$1 \text{ eV} = 1.60218 \times 10^{-19} \text{ J}$$

$$1 \text{ u} = 1.66054 \times 10^{-27} \text{ kg}$$

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、1eVおよび1u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	

$$\text{粘度 } 1 \text{ Pa}\cdot\text{s} (\text{N}\cdot\text{s}/\text{m}^2) = 10 \text{ P} (\text{ポアズ}) (\text{g}/(\text{cm}\cdot\text{s}))$$

$$\text{動粘度 } 1 \text{ m}^2/\text{s} = 10^4 \text{ St} (\text{ストークス}) (\text{cm}^2/\text{s})$$

圧力	MPa(=10 bar)	kgf/cm ²	atm	mmHg(Torr)	lbf/in ² (psi)
力	1	10.1972	9.86923	7.50062 × 10 ³	145.038
0.0980665	0.0980665	1	0.967841	735.559	14.2233
0.101325	0.101325	1.03323	1	760	14.6959
1.33322 × 10 ⁻⁴	1.33322 × 10 ⁻⁴	1.35951 × 10 ⁻³	1.31579 × 10 ⁻³	1	1.93368 × 10 ⁻²
6.89476 × 10 ⁻³	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 cal = 4.18605 J(計量法)	
								= 4.184 J(熱化学)	
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			

$$1 \text{ cal} = 4.18605 \text{ J(計量法)}$$

$$= 4.184 \text{ J(熱化学)}$$

$$= 4.1855 \text{ J(15°C)}$$

$$= 4.1868 \text{ J(国際蒸気表)}$$

$$\text{仕事率 } 1 \text{ PS(仮馬力)} = 75 \text{ kgf} \cdot \text{m/s}$$

$$= 735.499 \text{ W}$$

放射能	Bq	Ci	吸收線量	
			Gy	rad
1	2.70270 × 10 ⁻¹¹		1	100
3.7 × 10 ¹⁰	1		0.01	1

照射線量	C/kg	R	線量当量	
			Sv	rem
	1	3876	1	100
	2.58 × 10 ⁻⁴	1	0.01	1

(86年12月26日現在)

イメージングフレームによるつば江一〇 | 次第却系重水田マル!! | わづ配管中のノコモウムの測定