

JAERI-Research  
2001-015



JP0150351



加速器核変換システム用核破砕ターゲット  
からの核破砕生成物の放射能と毒性評価

2001年3月

西原 健司・佐々 敏信

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開している研究報告書です。

入手の間合わせは、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、お申し越してください。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, 2001

編集兼発行 日本原子力研究所

加速器核変換システム用核破砕ターゲットからの核破砕生成物の放射能と毒性評価

日本原子力研究所東海研究所エネルギーシステム研究部  
西原 健司 ・ 佐々 敏信

(2001年1月31日受理)

日本原子力研究所では陽子加速器により高速炉未臨界炉心を駆動する加速器駆動核変換システム(ADS)についての概念検討を行っている。このシステムを駆動するための中性子源を生成する核破砕ターゲットとして、ナトリウム冷却型システムでは固体タングステンターゲットを、鉛-ビスマス液体合金冷却型システムでは鉛-ビスマス冷却材をそのままターゲットを用いている。ADSでは炉内中性子による放射化生成物ばかりでなく、これらのターゲット、冷却材及び陽子ビーム窓から発生する核破砕生成物(SP)の収率、運転中及び冷却中の放射能、毒性を評価しておくことは、システムの運転あるいは使用済みターゲットの管理を検討するために必要である。本研究では、NMTC/JAERI97とDCAHIN-SPを用いてこれらの評価を行った。さらに、燃焼計算システムABC-SCを用いて炉内中性子によるターゲットの放射化についても評価した。

Estimation of Activity and Toxicity for Spallation Product from the Target  
for Accelerator-driven Transmutation System

Kenji NISHIHARA and Toshinobu SASA

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

(Received January 31, 2001)

Japan Atomic Energy Research Institute (JAERI) performs a conceptual study of the accelerator-driven transmutation system (ADS) which consists of the fast subcritical core driven by proton accelerator. As a spallation target to produce the neutron source to operate an ADS, two types of target system are proposed, solid tungsten target cooled by liquid sodium and liquid lead-bismuth target/coolant. To obtain the methods to operate the ADS and manage the irradiated targets, it is important to estimate the radioactivity produced not only by the neutron capture but also by the spallation reaction. In this study, radio-activities generated by spallation reaction were calculated by NMTC/JAERI97 and DCHAIN-SP code. The ABC-SC code is also used to determine the activities from low-energy neutron reaction.

Keywords: Accelerator Driven System, Tungsten Target, Lead-bismuth Liquid Alloy, Spallation Product, Activity, Toxicity

## 目 次

|                                     |   |
|-------------------------------------|---|
| 1 緒言 .....                          | 1 |
| 2 評価手法 .....                        | 1 |
| 2.1 使用コード .....                     | 1 |
| 2.2 評価体系 .....                      | 2 |
| 2.2.1 固体 W ターゲット/Na 冷却炉心 .....      | 2 |
| 2.2.2 Pb-Bi ターゲット/冷却炉心 .....        | 3 |
| 3 解析結果と考察 .....                     | 3 |
| 3.1 固体 W ターゲット/Na 冷却炉心 .....        | 3 |
| 3.1.1 核破碎生成物収率 .....                | 4 |
| 3.1.2 核破碎反応による放射化 .....             | 4 |
| 3.1.3 炉内中性子による放射化 .....             | 4 |
| 3.2 Pb-Bi ターゲット/冷却炉心 .....          | 4 |
| 3.2.1 核破碎生成物収率 .....                | 5 |
| 3.2.2 核破碎反応による放射化 .....             | 5 |
| 3.2.3 炉内中性子による放射化 .....             | 5 |
| 3.3 そのほかの検討 .....                   | 5 |
| 3.3.1 BNL での実験の解析 .....             | 5 |
| 3.3.2 誘導放射能の入射陽子エネルギー依存性 .....      | 6 |
| 3.3.3 Pb-Bi ターゲット/冷却炉心での揮発性核種 ..... | 6 |
| 3.3.4 W ターゲットの崩壊熱 .....             | 6 |
| 4 結論 .....                          | 7 |
| 参考文献 .....                          | 7 |

## Contents

|       |  |   |
|-------|--|---|
| 1     | Introduction .....                               | 1 |
| 2     | Calculation Method .....                         | 1 |
| 2.1   | Codes .....                                      | 1 |
| 2.2   | Estimated Accelerator Driven System .....        | 2 |
| 2.2.1 | W Target/ Na Coolant ADS .....                   | 2 |
| 2.2.2 | Pb-Bi Target/ Coolant ADS .....                  | 3 |
| 3     | Results .....                                    | 3 |
| 3.1   | W Target/ Na Coolant ADS .....                   | 3 |
| 3.1.1 | Yield of Spallation Product .....                | 4 |
| 3.1.2 | Activation by Spallation Reaction .....          | 4 |
| 3.1.3 | Activation by Neutron .....                      | 4 |
| 3.2   | Pb-Bi Target/ Coolant ADS .....                  | 4 |
| 3.2.1 | Yield of Spallation Product .....                | 5 |
| 3.2.2 | Activation by Spallation Reaction .....          | 5 |
| 3.2.3 | Activation by Neutron .....                      | 5 |
| 3.3   | Other Investigation .....                        | 5 |
| 3.3.1 | Analysis of Experiment in BNL .....              | 5 |
| 3.3.2 | Proton Energy Dependence of Activity .....       | 6 |
| 3.3.3 | Volatile Isotope Produced in the Pb-Bi ADS ..... | 6 |
| 3.3.4 | Decay Heat of the Spent W Target .....           | 6 |
| 4     | Conclusion .....                                 | 7 |
|       | References .....                                 | 7 |

## 1 緒言

日本原子力研究所では大強度陽子加速器と未臨界炉心から構成する加速器駆動システムによるマイナーアクチノイド (MA) 核変換技術についての検討を進めている。加速器駆動システムとしては固体タングステンターゲット/ナトリウム液体金属冷却のシステム及び鉛-ビスマス液体金属合金ターゲット/冷却のシステムの二つを候補としているが、これらのハイブリッドシステムにおいては従来の原子炉でも発生する炉内中性子による放射化生成物の他に、大強度の陽子ビームによって核破砕生成物 (SP) が生成される。SP は核分裂生成物 (FP) と異なり、標的核種近傍に大きなピークを持つ独特な生成核種分布を持つ。このため標的核種への依存性が大きく、また、FP では問題とならなかった核種も重要となる。今回二つの加速器駆動システムにおいてどのような SP が生成され放射能を持つかを評価した。さらに、炉内中性子による放射化との比較を行った。

## 2 評価手法

加速器駆動核変換システムとして検討している 2 つの体系に対して核破砕反応及び炉内中性子による放射化を検討した。放射化の指標として放射能 (Bq) だけではなく、炉外での人間に対する毒性の指標である経口摂取限度 (ALI) を使って定義する毒性指数も用いた。毒性指数は次式で定義されている。

$$\text{毒性指数} = \Sigma (\text{各核種の放射能} / \text{各核種の ALI})$$

経口摂取限度は ICRP publication 30 [1] で示された値を用いているが、今回の計算で大きな放射能を持つ同位体の中に経口摂取限度が規定されていないものがある。これらの同位体についてはポロニウムを除いて今回は考慮しなかったため毒性指数は実際より小さく評価されている。

以下、使用したコードと評価した体系について説明する。

### 2.1 使用コード

核破砕反応によりターゲット内で生成される核種の誘導放射能、毒性及び崩壊熱を評価するために、まず、核破砕解析コード NMTC/JAERI97 [2] で入射陽子当たりの核破砕生成物収率を計算し、続いて、誘導放射能計算コード DCAHIN-SP [3] に照射条件を与えて照射及び冷却中の核種生成、崩壊計算を行った。

なお、NMTC/JAERI97 では核異性体を計算することができるが、この評価では用いなかった。現在のバージョンでは 20MeV でのライブラリしか無く、50MeV 以上のエネルギー領域における核異性体生成について基底状核と異性核が均等の割合で生成されるとしているからである。核異性体生成のオプションを使用した場合、600 日間照射した鉛-ビスマスターゲットの放射能 (Table 1) の評価において、照射中に 20% 程度、冷却期間においては 2-3% 大きく放射能を計算する。

また、長期間の照射によって核破砕生成物が再び核破砕される効果については考慮していない。これに関しては、Pb-Bi についてはターゲットが循環していることから、考慮に入れる必要は小さい。W ターゲットについては後述するように、600 日の運転でターゲット組成の 7% 程度が変化するため、より詳細に検討する余地がある。

核破碎ターゲットは炉内中性子によっても放射化されるが、それについても解析した。今回の解析では、核破碎反応による放射化と炉内中性子による放射化を独立に見積もったため、核破碎生成物の炉内中性子による放射化や、炉内中性子による放射化生成物の核破碎反応は、評価されていない。核破碎反応による放射能は陽子ビームの電流密度 ( $I$ ) に比例し、炉内中性子による放射能は炉内中性子束、すなわち炉出力 ( $P$ ) に比例するが、これら二つの値の相関は炉心の実行増倍係数 ( $k_{eff}$ ) をパラメータとして、近似的に式 (1) のようになる。

$$P \propto \frac{I}{1 - k_{eff}} \quad (1)$$

つまり、燃焼等によって  $k_{eff}$  が変化した場合、 $I$  と  $P$  の割合が変化するわけであるが、今回の解析では常に  $I$  は 25mA、 $P$  は 800MWt であるとした。このときの  $k_{eff}$  はおよそ 0.95 である。

炉内中性子による放射化については SLAROM, TWODANT, ORIGEN2 等のコードを統合した燃焼計算システム ABC-SC [4] を用いて解析した。この計算システムを用いることで、核破碎中性子を中性子源とした未臨界炉の中性子レベルとそのスペクトルが得られ、それらから中性子放射化一群断面積を求めて、運転条件に合わせた放射化量を評価することができる。

中性子輸送コード TWODANT での固定源計算で用いた核破碎生成中性子源は NMTC/JAERI97 で計算した。具体的には、NMTC/JAERI97 の計算で 20MeV 以下に出現した中性子を、ATRAS コードシステム [5] 中の FSOURCE によって編集し、TWODANT 用の中性子源ファイルを得た。TWODANT では、高エネルギーの陽子中性子輸送を計算することなく、もっと簡単に、固定源計算ではなく固有値計算で中性子束を得ることも可能である。しかし、Fig.1 に示すように固有値計算と固定源計算ではターゲット部において 2 倍程度の中性子束の差が見られ、ターゲット部の放射化に関しては大きな誤差を生じるため、固定源計算を行うことが必要である。

炉心出力の規格化は源の強度に依らず、800MWt で行った。そのため、タングステンターゲットナトリウム冷却炉心の場合、本来のビーム入力は 25mA であるが TWODANT の固定源計算上は 800MWt の出力を得るのに 39mA の入力を必要とした。これはターゲットや体系の最適化がなされていないためであり、今回の計算では 25mA の陽子ビームが入力されるとして核破碎反応による放射化を計算した。

## 2.2 評価体系

### 2.2.1 固体 W ターゲット/Na 冷却炉心

Fig.2 に W ターゲット/Na 冷却炉心の NMTC 計算モデルを示す。W ターゲットは直径 50cm、高さ 85cm の円柱形とし、そこにエネルギー 1.5GeV の陽子が入射するとした。ビームプロファイルは直径 40cm の一様分布とした。W ターゲットは Fig.3 に示した様なディスク構造をしておりそれを Na で冷却する。従って、W だけでなく Na も核破碎の対象となる。陽子ビーム窓材については、Table 4 に示した組成の厚さ 3mm のステンレスとしたが、窓材にかかる負担は大きく、今後開発されていくと思われる。

ABC-SC による中性子放射化計算では、W ターゲット、MA+Pu 炉心、反射体領域の物質が均質に混合されているとして、炉心計算を行った。(Table 2)



運転条件は 25mA の陽子ビームを連続 600 日間打ち込むことで 800MWt の出力を得るとした。ターゲットや、特に窓材はかなりの頻度での交換が必要であると考えられるが、600 日間無交換であるとして計算を行った。

評価の観点を以下に記す。

- W ターゲットからの SP 及び中性子放射化生成物の漏れはほとんど無いと考えられる。従って問題となるのは、運転直後から保管期間における W ターゲットアセンブリからの  $\gamma$  線強度と崩壊熱である。
- 冷却材である Na で生じる SP 及び FP については、運転時の一次系配管破断やメンテナンス時のリークによる放射能汚染を評価する為に、運転中及び運転直後の期間における放射能が問題となる可能性がある。

### 2.2.2 Pb-Bi ターゲット/冷却炉心

Fig.4 に Pb-Bi ターゲット/冷却炉心の計算モデルを、Table 3 に均質化された組成をそれぞれ示す。ビーム形状、運転履歴は W ターゲット/Na 冷却炉心の場合と同じである。陽子ビーム窓も W ターゲット/Na 冷却炉心の場合と同様であるとし、陽子ビーム窓の解析は Pb-Bi ターゲット/冷却炉心についてのみ行った。

評価の観点を以下に記す。

- Pb-Bi 液体金属中に発生する SP 及び中性子放射化生成物は、前述の Na 冷却材と同様に運転中及び直後、また保管期間でも放射能を評価する必要がある。
- Pb-Bi 液体金属の放射化によって、希ガスや  $\alpha$  崩壊核種であるポロニウムが発生する。これらを代表とする揮発性の放射性核種は、運転中にはカバーガス中に揮発する上、冷却材リーク時にはコンパートメント中に拡散するので、別途評価が必要である。

## 3 解析結果と考察

### 3.1 固体 W ターゲット/Na 冷却炉心

W ターゲット/Na 冷却炉心内で発生する、全ての誘導放射能及びその毒性を、Fig.6 と Fig.7 にそれぞれ示した。ターゲットの放射能は、炉内構造材の放射化による放射能に比べ一桁小さい程度であるが、W ターゲットの重量は構造材の 1/60 であり、放射化の密度は高い。W ターゲットの放射化による放射能は、核破砕反応による放射能よりも運転後半年程度は大きい、その後は逆転し、核破砕反応による放射能の方が大きくなる。Na 冷却材に関しては炉内だけでなく一次系を循環することから運転中、運転直後一ヶ月程度の短い期間の誘導放射能が重要になる。放射化による放射能は運転後数日で寄与がなくなり、その後は全て核破砕反応による放射能のみとなる。

以下の節で、核破砕及び放射化によって生成される放射性同位体毎の寄与について検討する。

### 3.1.1 核破碎生成物収率

Table 5 に核破碎生成物の総量を、Fig.5 に質量数毎の収率を示した。いずれの場合も、大きな収量を持つのは質量数がターゲット核種よりも少し小さい核種であることがわかる。

W ターゲットでは 600 日交換無しで運転した場合、ターゲット全体で 600mol(110kg) 程度の W が核破碎反応に費やされる。これは、W ターゲット全体の 7%程度にあたる。核破碎生成物は W ターゲットに近い質量の元素であるから、核破碎によって生成される陽子一個あたりの中性子数には大きな影響を与えないと考えられるが、核破碎生成物がさらに核破碎され、あるいは中性子を吸収して、他の放射性同位体を生成する可能性がある。

Na 冷却材では質量数 22 にピークがあるがこのうちの 6 割は Na-22(半減期 2.6y) であり、照射後数十年は Na-22 からの放射能が支配的である。

### 3.1.2 核破碎反応による放射化

Fig.8 に陽子ビーム照射中及び照射後の、W ターゲット内の放射能を主な放射性同位体毎に示した。放射能に関しては特に照射後短い期間において質量数が 170 以上の核種が支配的である。その後も核分裂生成物 (FP) では重要ではない核種が主な放射能を持つ。毒性に関しては、照射後 5 年から 1000 年に渡って毒性の強い Gd-148( $\alpha$  崩壊、半減期 74.6y、ALI= $4 \times 10^5$  Bq) が支配的となる。比較的大きな放射能を持つ Ho-163 に関しては ALI が与えられていない。

Fig.9 に照射中及び照射後の Na 冷却材の放射能を主な放射性同位体毎に示した。これらから、もっとも問題となるのは  $8 \times 10^{15}$  Bq の放射能を持つ Na-22 であることがわかる。また、Na-22 と C-14 以外の核種は問題とならない。

### 3.1.3 炉内中性子による放射化

Fig.10 に運転中及び運転後の、炉内中性子による W ターゲット内の放射能を主な放射性同位体毎に示した。運転後数日で、W-185 等の半減期が 60 日程度の核種が支配的となり、10 年後には  $2 \times 10^8$  Bq、毒性に直して 1ALI 以下にまで減衰する。

Fig.11 に運転中及び運転後の、炉内中性子による Na 冷却材の放射能を主な放射性同位体毎に示した。Na 冷却材において重要なのは Na-24(15h) と Na-22(2.6y) のみであり、短期的な Na-24 は運転中に核破碎生成物以上の放射能を持つが、長期的な Na-22 は核破碎反応で生じる Na-22 の 1/2000 しか生成されない。

## 3.2 Pb-Bi ターゲット/冷却炉心

Pb-Bi ターゲット/冷却炉心内で発生する全ての誘導放射能及びその毒性を、それぞれ Fig.12 と Fig.13 に示した。Pb-Bi 合金冷却材の毒性は、運転後 5 年間は炉内中性子による放射化の寄与が大きい。これは炉内中性子によって Po-210( $\alpha$  崩壊、半減期 138d) が多量に生成されるからである。

### 3.2.1 核破碎生成物収率

Table 5に、核破碎生成物の総量を、Fig.5に質量数毎の収率を示した。核破碎反応によるPo-210生成は中性子吸収により生成される量の1%程度である。

### 3.2.2 核破碎反応による放射化

Fig.14とFig.15に照射中及び照射後のPb-Biターゲット内の放射能と毒性を主な放射性同位体毎に示した。放射能に関してはほとんど全ての期間において質量数が190以上の核種が支配的である。特に、Bi-207、Hg-194、Pb-202などの長寿命核種が生成され減衰が遅い。毒性に関しても質量数の大きい核種が支配的である。

注意する点として、Po-208( $\alpha$ 崩壊、半減期2.90y)とPo-209( $\alpha$ 崩壊、半減期102y)に関しては大きな放射能を持つ $\alpha$ 崩壊核種であるにも関わらずALIが求められていない。核破碎反応の場合、Fig.16で示すようにPo-210と比較してPo-208、Po-209も同等以上の放射能を持つため、毒性評価においてこの二核種は重要である。今回の評価では、ICRP publication 68 [7]で新たに示されたモデルで計算した二核種のALIは、Po-210と同等の値であったので、二核種のALIはPo-210と同じ値であるとして毒性を見積もった [6]。

Fig.17に照射中及び照射後の陽子ビーム窓の放射能を主な放射性同位体毎に示した。600日運転後は $1 \times 10^{15}$ Bq程度の放射能を持ち、照射後20年間で最も支配的なのはFe-55(半減期2.7y)である。

### 3.2.3 炉内中性子による放射化

Fig.18に運転中及び運転後の炉内中性子によるPb-Biターゲット内の放射能を主な放射性同位体毎に示した。強い放射能を持つのはPo-210、Bi-208( $\beta$ 崩壊、半減期 $3.7 \times 10^5$ y)、Bi-210m( $\alpha$ 崩壊、半減期 $3.0 \times 10^6$ y)の三核種である。Po-210は親水性があり、炉外に漏れ出た場合の毒性が非常に強い。Bi-208に関してはALIが与えられていない。

## 3.3 そのほかの検討

### 3.3.1 BNLでの実験の解析

今回の核破碎反応による誘導放射能の計算精度はNMTC/JAERI97による核破碎生成物収率の計算精度に大きく依存している。計算値にどれほどの誤差があるかを調べるために、最近ブルックヘブン国立研究所(BNL)で行われたWターゲットとPbターゲットに対する1GeV陽子ビームでの放射化実験 [8]をNMTC/JAERI97とDCAHIN-SPで解析した。これは十分な厚さを持ったターゲットを20分から200分程度照射した後、数時間おいてガンマ線スペクトルを測定し半減期が30分から数日の数十の核種を特定する実験であり、10%以下の誤差で測定時点での核種数が求められている。参考文献のTABLE.IIに記載されている実験の一部データに対応する計算結果をFig.19及びFig.20に示した。鉛ターゲットの場合には、ターゲット核種に近い質量数を持つ

核種の生成量を、一桁小さく見積もっている事がわかる。W ターゲットと Pb ターゲットの計算値の実験値に対する比の頻度分布をそれぞれ Fig.21 と Fig.22 に示した。測定された核種のうち、計算値と測定値の比が 2 倍以内に入っている核種は W ターゲットの場合は 70%であったが、Pb ターゲットの場合は 45%しかなかった。この結果から、今回の核破砕反応に関する計算には数倍の誤差がある可能性がある。特に Pb ターゲットの場合は、過小評価となっている核種が多く 3.2 節の結果にはこれを考慮する必要がある。

### 3.3.2 誘導放射能の入射陽子エネルギー依存性

今回の検討では全て 1.5GeV の陽子ビームが入射するとしたが、この節で陽子エネルギー依存性について検討する。1.0GeV 以上の陽子ビームが入射した場合、ターゲットからの中性子収量はほぼ陽子エネルギーに比例するので、1MW の出力の陽子ビームが入射するとして比較を行った。計算を行った陽子エネルギーは 0.6GeV、1.0GeV、1.5GeV、3.0GeV であり、1MW で規格化を行った。W ターゲット、Na 冷却材、Pb-Bi に関しては目立ったエネルギー依存性はないが、陽子ビーム窓に関しては Fig.23 に示した様にエネルギーが高くなるほど電流密度が低くなるため放射能は低くなる。

### 3.3.3 Pb-Bi ターゲット/冷却炉心での揮発性核種

Pb-Bi 液体金属内で生じた放射化生成物と核破砕生成物は炉内を循環し、メンテナンスの際に機器や燃料に付着し悪影響を及ぼす。なかでも、揮発性の物質が格納容器内上部に蒸発した場合メンテナンスの際に放出され得る。Na 冷却材の場合は放射化でも、核破砕でも揮発性を伴う放射性核種の生成は見られない。ただし、核破砕生成物計算で用いた NMTC/JAERI97 はトリチウムの生成を計算しないので、トリチウムについては不明である。Pb-Bi ターゲットの場合、Fig.24 に示したような希ガスが生成される。また、Hg に関しては冷却材温度が沸点付近であるため蒸発する可能性がある。Bi-209 の放射化等によって発生する Po-210 にも揮発性があるので検討が必要である。

### 3.3.4 W ターゲットの崩壊熱

使用済みターゲットの保管方法を考えるために、核破砕と炉内の中性子場によって W ターゲットから発生する崩壊熱を見積もった。Fig.25 に放射化と核破砕に起因する崩壊熱を示した。運転中及びシャットダウン後半年間は中性子放射化による崩壊熱が強いがその後は核破砕反応による崩壊熱が強い。シャットダウン 10 日後の崩壊熱は  $0.17\text{W}/\text{cm}^3$  程度と小さく、これ以降は強制的な冷却は必要ないと考えられる。

## 4 結論

固体 W ターゲット/Na 冷却及び、Pb-Bi ターゲット/冷却の二つ加速器駆動核変換システムについて核破碎生成物の放射能を調べた。その結果、中性子による放射化よりも減衰の遅い核種が主に生成され、運転後数日から数年後が過ぎた後は核破碎生成物の放射能が支配的であることがわかった。また、核破碎生成物はほとんど全ての質量数に渡って分布しており、中には揮発性核種など運転上問題になり得る核種も見られた。今後この計算結果を基にこれらの放射能が加速器駆動システムの運転に及ぼす影響を検討していく必要がある。ただし、3.3.1 項に示したように核破碎生成物収率に関しては実験と核破碎コードによる計算結果の間の差が大きく、今回の計算結果にも大きな誤差が含まれる可能性が示されている。今後、多くのターゲット実験と実験解析に基づく核破碎コードの改良を進める必要がある。

## 参考文献

- [1] ICRP Publication 30 Part 1(1979);Part 2(1980);Part 3(1981); Part 4(1988).
- [2] H.Takada, N.Yoshizawa, K.Kosako, K.Ishibashi: JAERI-Data/Code 98-005,(1998).
- [3] H.Takada and K.Kosako: JAERI-Data/Code 99-008,(1999).
- [4] 軍司, 向山, 高野, 滝塚: JAERI-M 92-03,(1992).
- [5] 佐々, 辻本, 滝塚: JAERI-M 10-197,(1998).
- [6] 遠藤 章: 私信.
- [7] ICRP Publication 68(1994).
- [8] C.E.Laird, D.H.Mullins, D.B.McGibney, John Swartz, R.W.Kamau: *Nucl. Sci. Eng.*, **130**, 320 (1998).

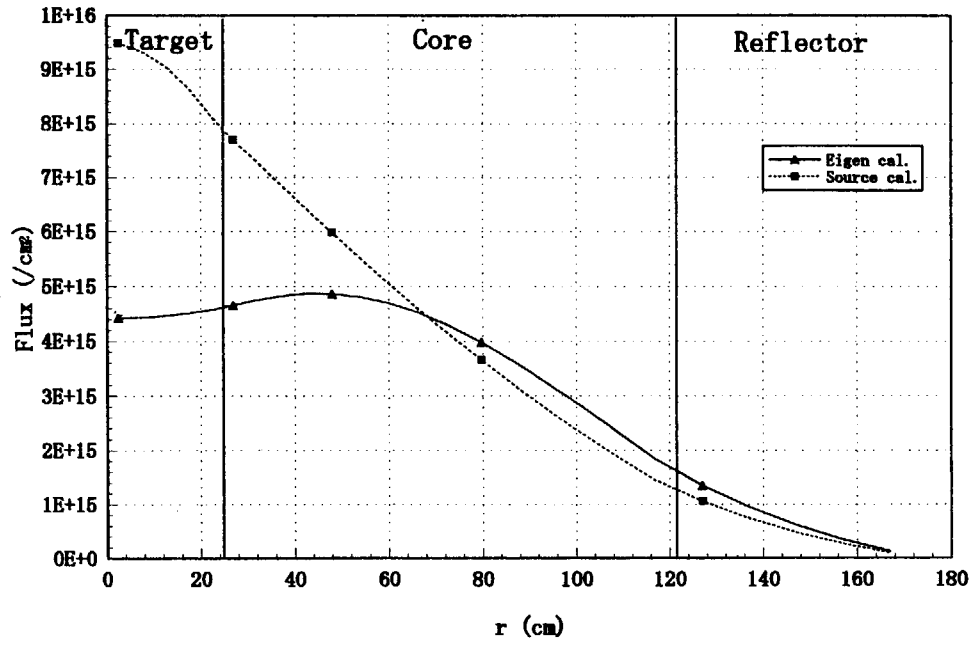


Fig. 1: Neutron flux below 10 MeV in the Pb-Bi target ADS calculated by TWODANT eigen value calculation and source calculation.

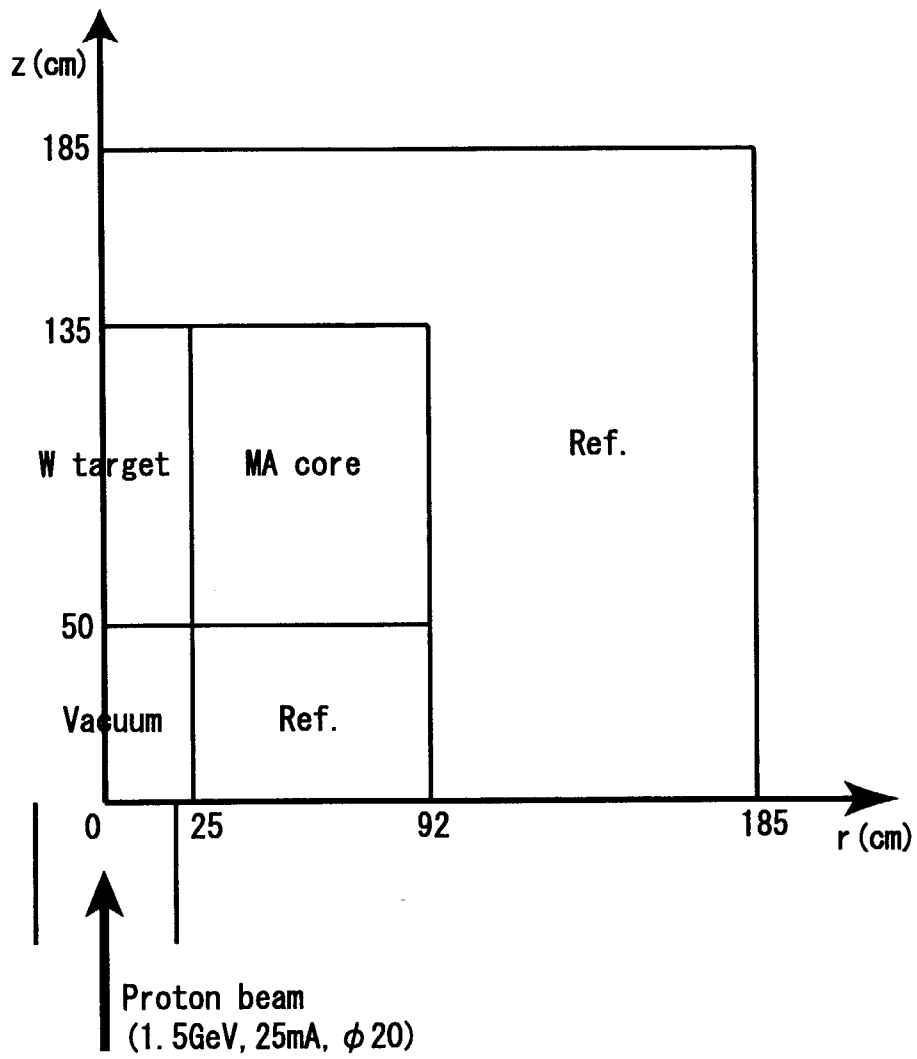


Fig. 2: Calculation model for the W target core.

Table 1: Activity calculation of the Pb-Bi target using NMTC with isomer option.

|         | Time      | Activity with isomer<br>option (Bq) | Activity without isomer<br>option (Bq) | Difference(%) |
|---------|-----------|-------------------------------------|--|---------------|
| Driving | 30day     | 9.48E+17                            | 7.90E+17                               | 19.90%        |
|         | 100day    | 9.80E+17                            | 8.23E+17                               | 19.18%        |
|         | 300day    | 9.99E+17                            | 8.40E+17                               | 18.82%        |
|         | 600day    | 1.01E+18                            | 8.52E+17                               | 18.60%        |
| Cooling | 1day      | 3.58E+17                            | 3.50E+17                               | 2.38%         |
|         | 10day     | 1.27E+17                            | 1.24E+17                               | 1.89%         |
|         | 30day     | 6.64E+16                            | 6.49E+16                               | 2.21%         |
|         | 90day     | 3.66E+16                            | 3.57E+16                               | 2.54%         |
|         | 1year     | 1.68E+16                            | 1.65E+16                               | 1.62%         |
|         | 3year     | 8.21E+15                            | 8.19E+15                               | 0.26%         |
|         | 10year    | 4.68E+15                            | 4.67E+15                               | 0.03%         |
|         | 30year    | 2.77E+15                            | 2.77E+15                               | 0.02%         |
|         | 100year   | 6.53E+14                            | 6.53E+14                               | 0.04%         |
|         | 1000year  | 1.38E+13                            | 1.38E+13                               | 0.19%         |
|         | 10000year | 1.60E+12                            | 1.64E+12                               | -2.42%        |

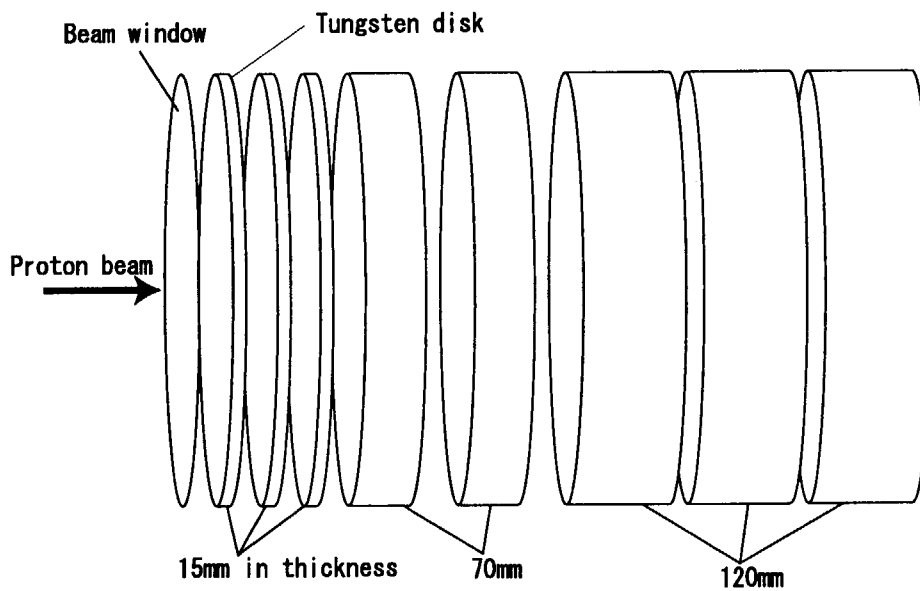


Fig. 3: NMTC calculation model for the W target consisting of 8 disks.



Table 2: The components of the the W target core.

|            | Nuclide  | Number density ( $10^{24}$ atoms/cm <sup>3</sup> ) |
|------------|----------|--|
| W target   | W-nat    | 4.419E-2 <sup>a</sup>                              |
|            | Na-23    | 3.458E-2   |
| MA-Pu core | Np-237   | 1.262E-3   |
|            | Pu-238   | 2.352E-5   |
|            | Pu-239   | 7.416E-4   |
|            | Pu-240   | 5.359E-4   |
|            | Pu-241   | 1.272E-4   |
|            | Pu-242   | 6.965E-5   |
|            | Am-241   | 5.932E-4   |
|            | Am-243   | 2.696E-4   |
|            | Cm-243   | 6.740E-7   |
|            | Cm-244   | 1.148E-4   |
|            | Cm-245   | 6.291E-6   |
|            | Y-89     | 7.056E-3   |
|            | N-15     | 1.080E-2   |
|            | Fe-nat   | 1.250E-2   |
|            | Mn-nat   | 3.229E-4   |
|            | Ni-nat   | 2.659E-3   |
| Cr-nat     | 3.039E-3 |  |
| Mo-nat     | 4.748E-4 |  |
| Na-23      | 9.401E-3 |  |
| Reflector  | Fe-nat   | 3.424E-2   |
|            | Mn-nat   | 5.061E-4   |
|            | Ni-nat   | 6.000E-3   |
|            | Cr-nat   | 8.599E-3   |
|            | Mo-nat   | 1.265E-3   |
|            | Na-23    | 8.673E-3   |

<sup>a</sup>Read as  $4.419 \times 10^{-2}$

Table 3: The components of the Pb-Bi target core.

|              | Nuclide  | Number density ( $10^{24}$ atoms/cm <sup>3</sup> ) |
|--------------|----------|--|
| Pb-Bi target | Pb-nat   | 1.321E-2   |
|              | Bi-209   | 1.634E-2   |
| MA-Pu core   | Np-237   | 7.840E-4   |
|              | Pu-238   | 1.455E-5   |
|              | Pu-239   | 4.568E-4   |
|              | Pu-240   | 3.288E-4   |
|              | Pu-241   | 7.768E-5   |
|              | Pu-242   | 4.237E-5   |
|              | Am-241   | 3.623E-4   |
|              | Am-243   | 1.633E-4   |
|              | Cm-243   | 4.083E-7   |
|              | Cm-244   | 6.926E-5   |
|              | Cm-245   | 3.780E-6   |
|              | Y-89     | 7.056E-3   |
|              | N-15     | 8.423E-3   |
|              | Fe-nat   | 4.635E-3   |
|              | Mn-nat   | 6.981E-5   |
|              | Ni-nat   | 7.842E-4   |
|              | Cr-nat   | 1.254E-3   |
| Mo-nat       | 9.994E-5 |  |
| Reflector    | Pb-nat   | 8.304E-3   |
|              | Bi-209   | 1.027E-2   |
|              | Fe-nat   | 2.823E-2   |
|              | Mn-nat   | 4.251E-4   |
|              | Ni-nat   | 4.776E-3   |
|              | Cr-nat   | 7.636E-3   |
|              | Mo-nat   | 6.086E-4   |
|              | Pb-nat   | 6.605E-3   |
|              | Bi-209   | 8.168E-3   |

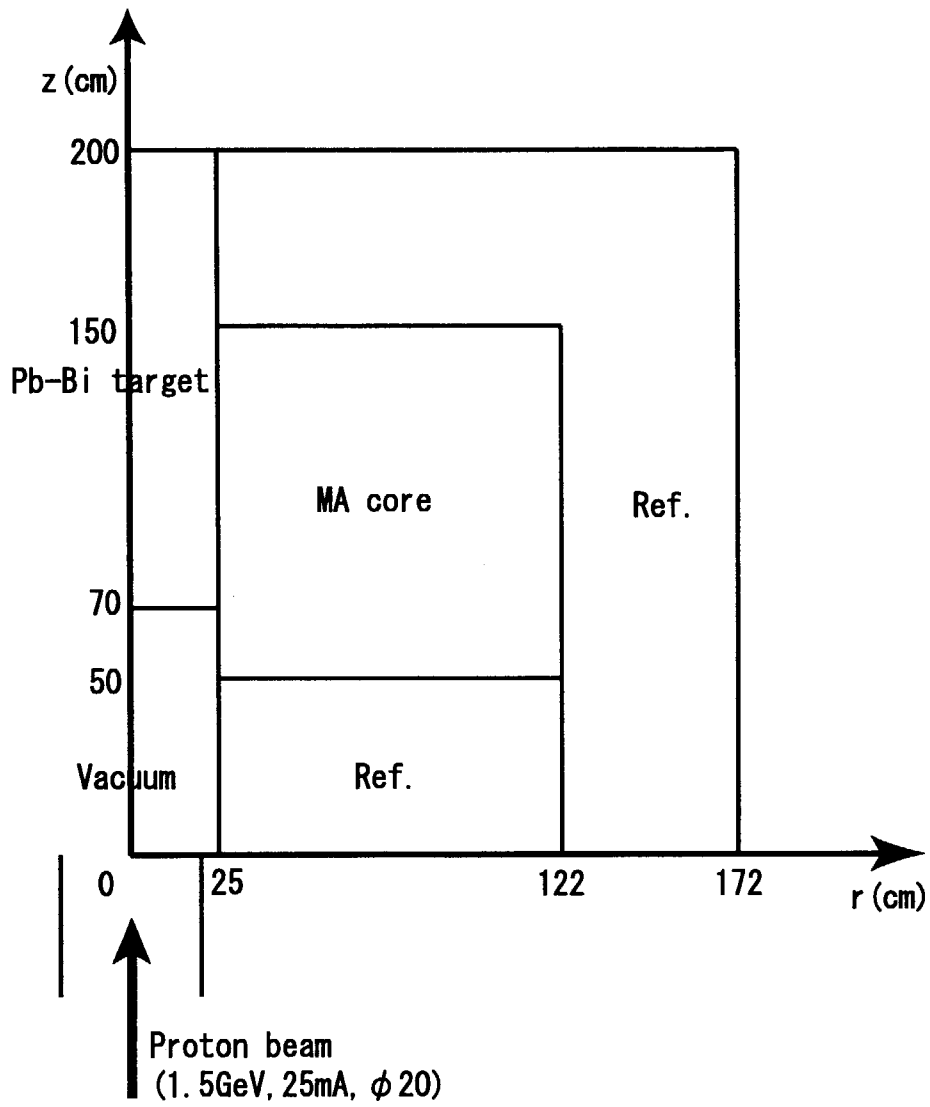


Fig. 4: Calculation model for the Pb-Bi target core.

Table 4: The components of the target window.

|        | Nuclide | Number density ( $10^{24}$ atoms/cm <sup>3</sup> ) |
|--------|---------|--|
| SUS316 | Fe-nat  | 5.646E-2   |
|        | Mn-nat  | 1.527E-2   |
|        | Ni-nat  | 9.551E-3   |
|        | Cr-nat  | 1.217E-3   |
|        | Mo-nat  | 8.503E-4   |

Table 5: Number of SP yield in the targets irradiated by 1.5GeV proton beam.

|  | W target | Na coolant | Pb-Bi target | Window  |
|--|----------|------------|--------------|---------|
| Neutron yield per one proton <sup>a</sup>            | 24.0     | -          | 31.8         | -       |
| SP yield per one proton                              | 3.0      | 0.66       | 4.0          | 0.066   |
| SP yield per 1mA proton beam <sup>b</sup>            | 1.9E+16  | 4.1E+15    | 2.5E+16      | 4.1E+14 |
| SP yield per 25mA beam<br>after 600 days irradiation | 2.4E+25  | 5.4E+24    | 3.2E+25      | 5.4E+23 |

<sup>a</sup>Number of neutrons produced by one proton<sup>b</sup>Number of SP produced by  $6.2 \times 10^{15}$  protons per second

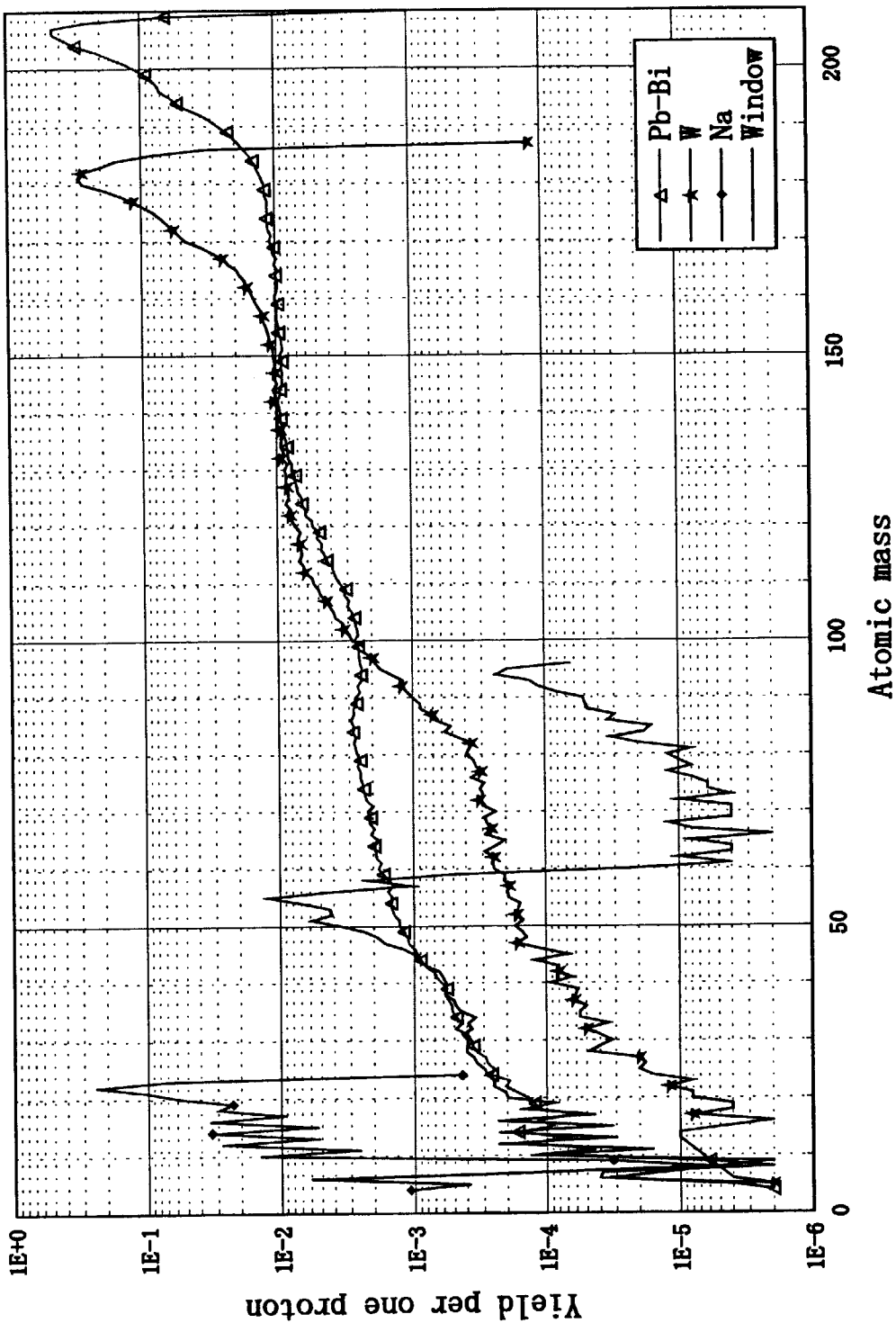


Fig. 5: Spallation product yield in the targets and the coolant irradiated by a 1.5 GeV proton.

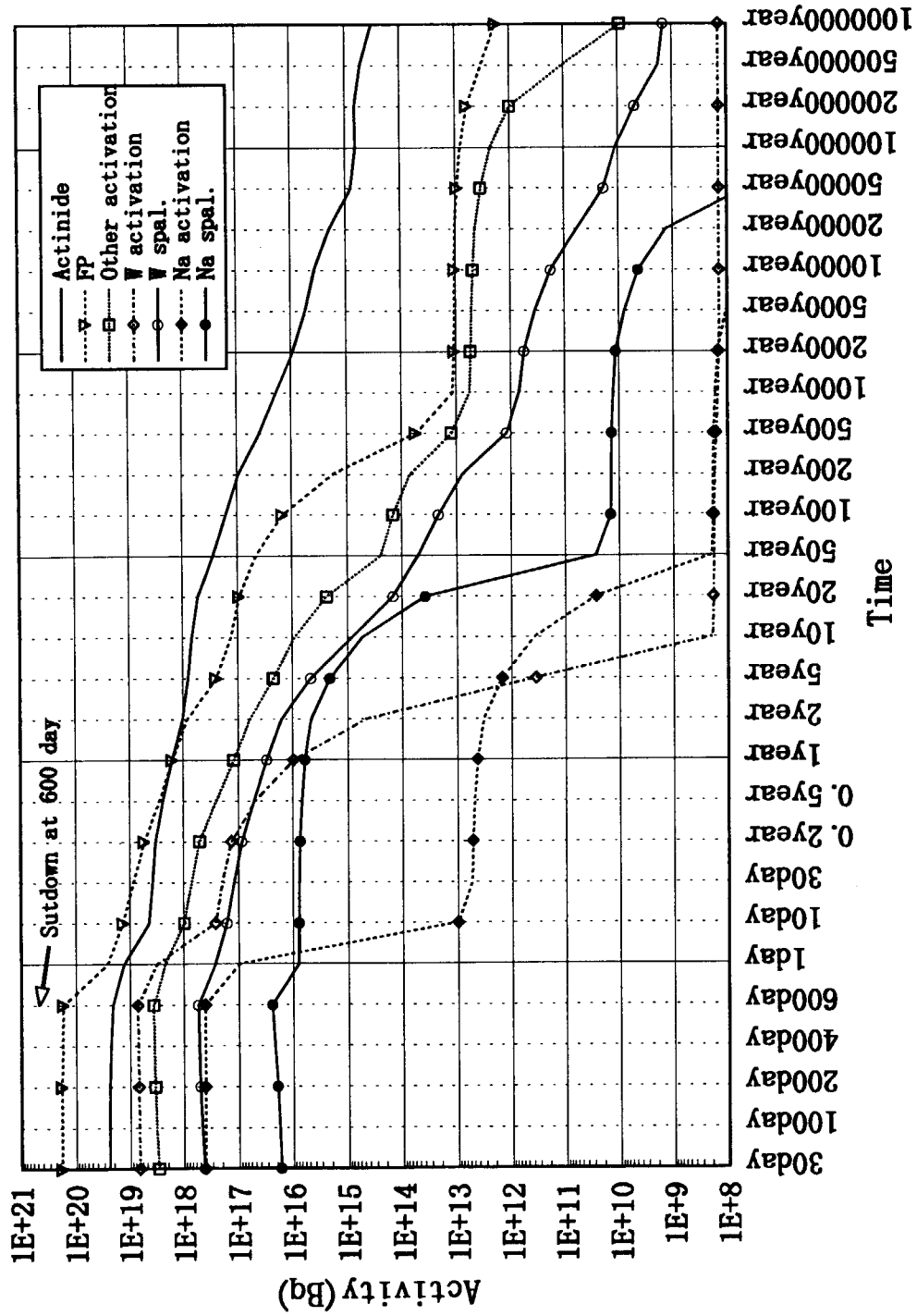


Fig. 6: Activity of SP and activation product from the W target ADS.

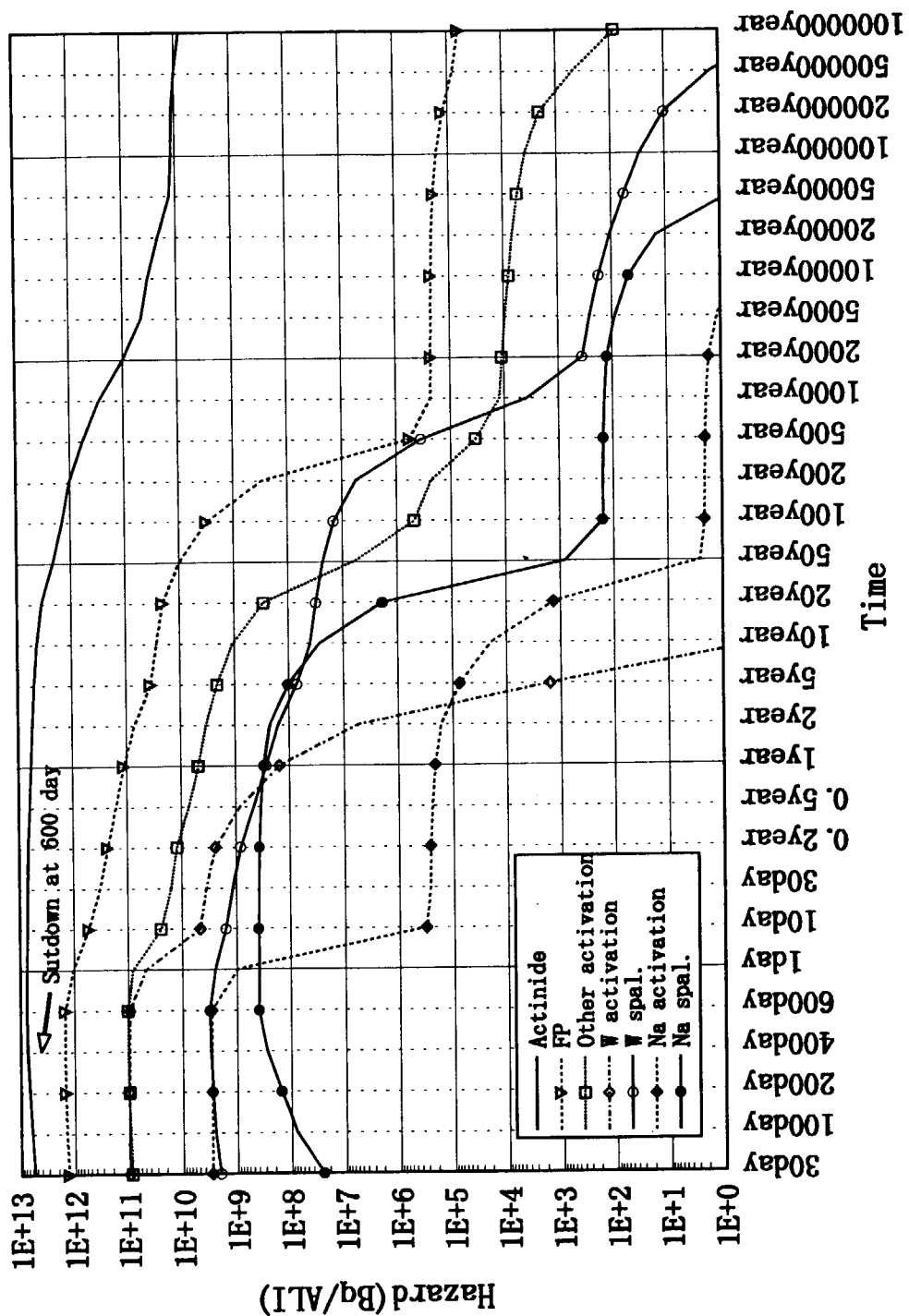


Fig. 7: Hazard of SP and activation product from the W target ADS.

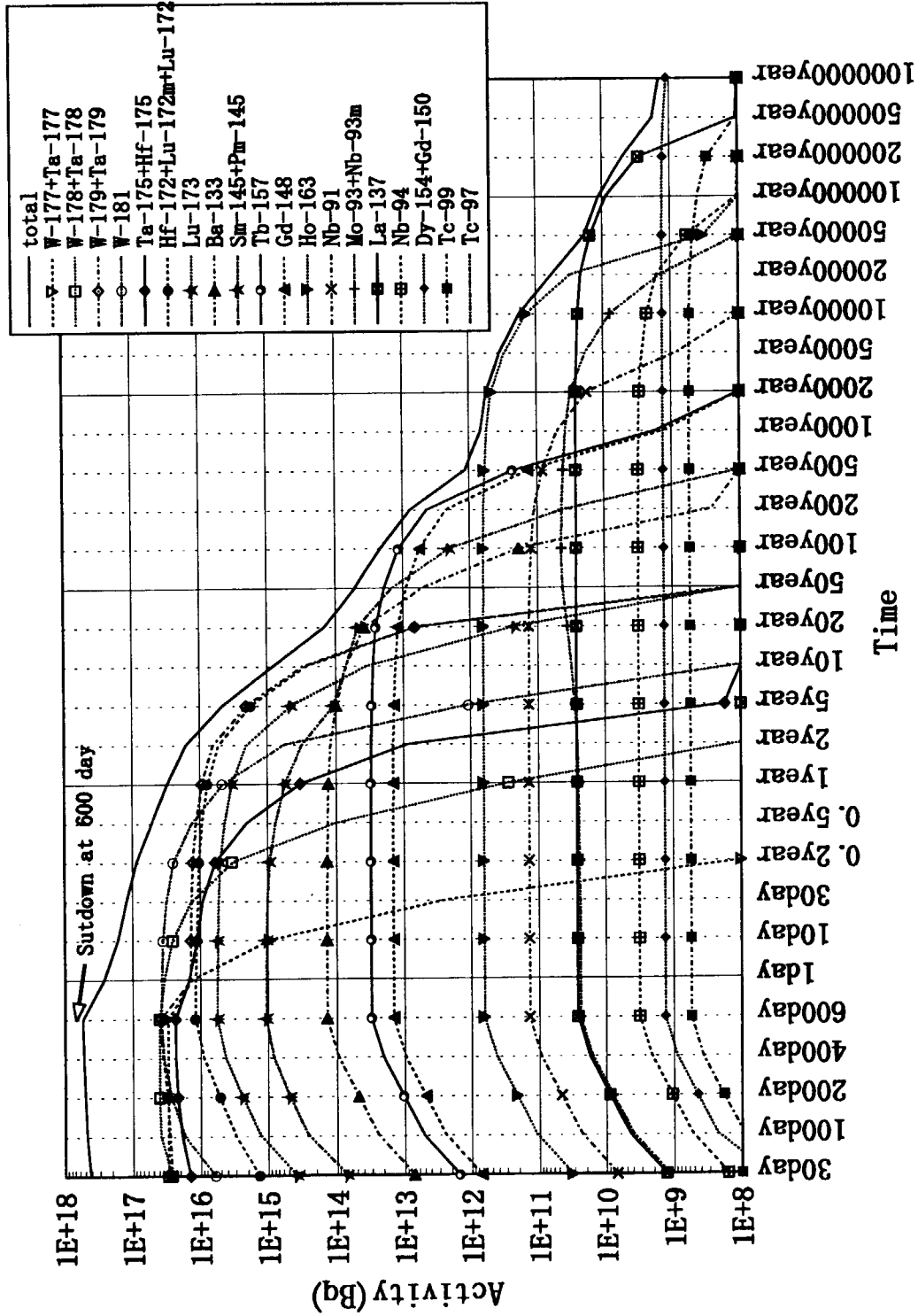


Fig. 8: Activity of SP from the W target irradiated by 25mA 1.5GeV proton beam during 600 days.



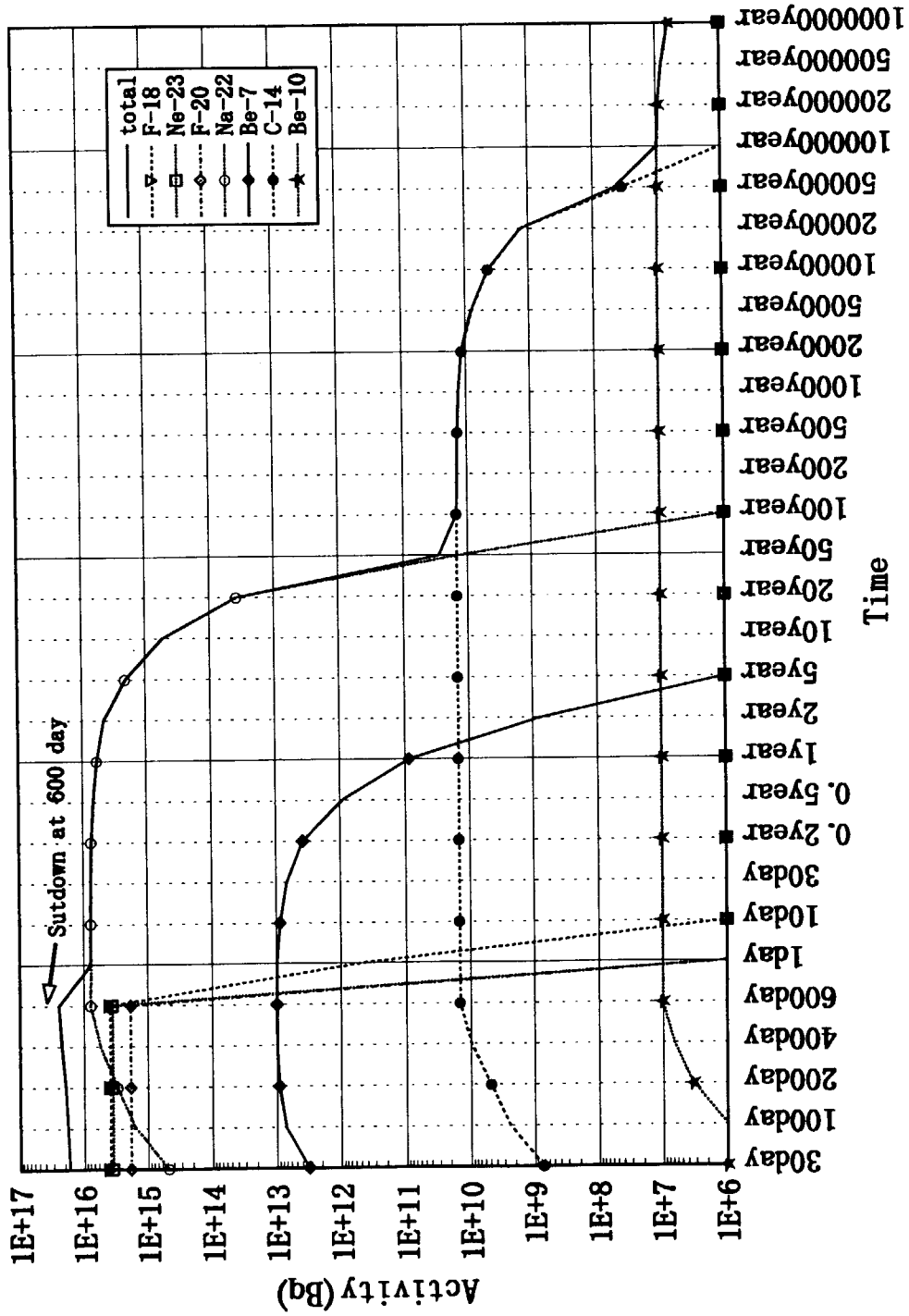


Fig. 9: Activity of SP from the Na coolant irradiated by 25mA 1.5GeV proton beam during 600 days.

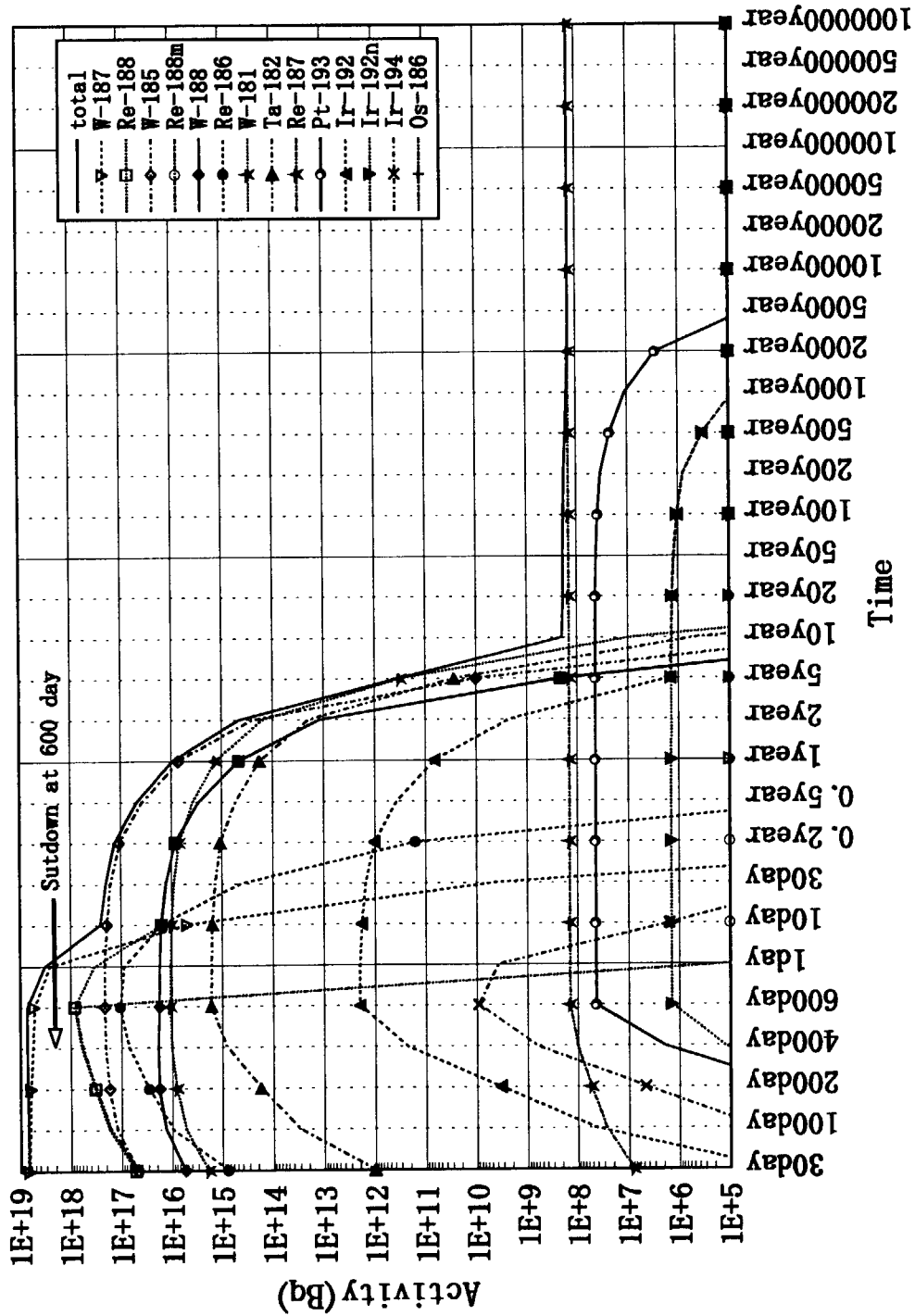


Fig. 10: Activity of activation product from the W target irradiated by neutron during 600 days.

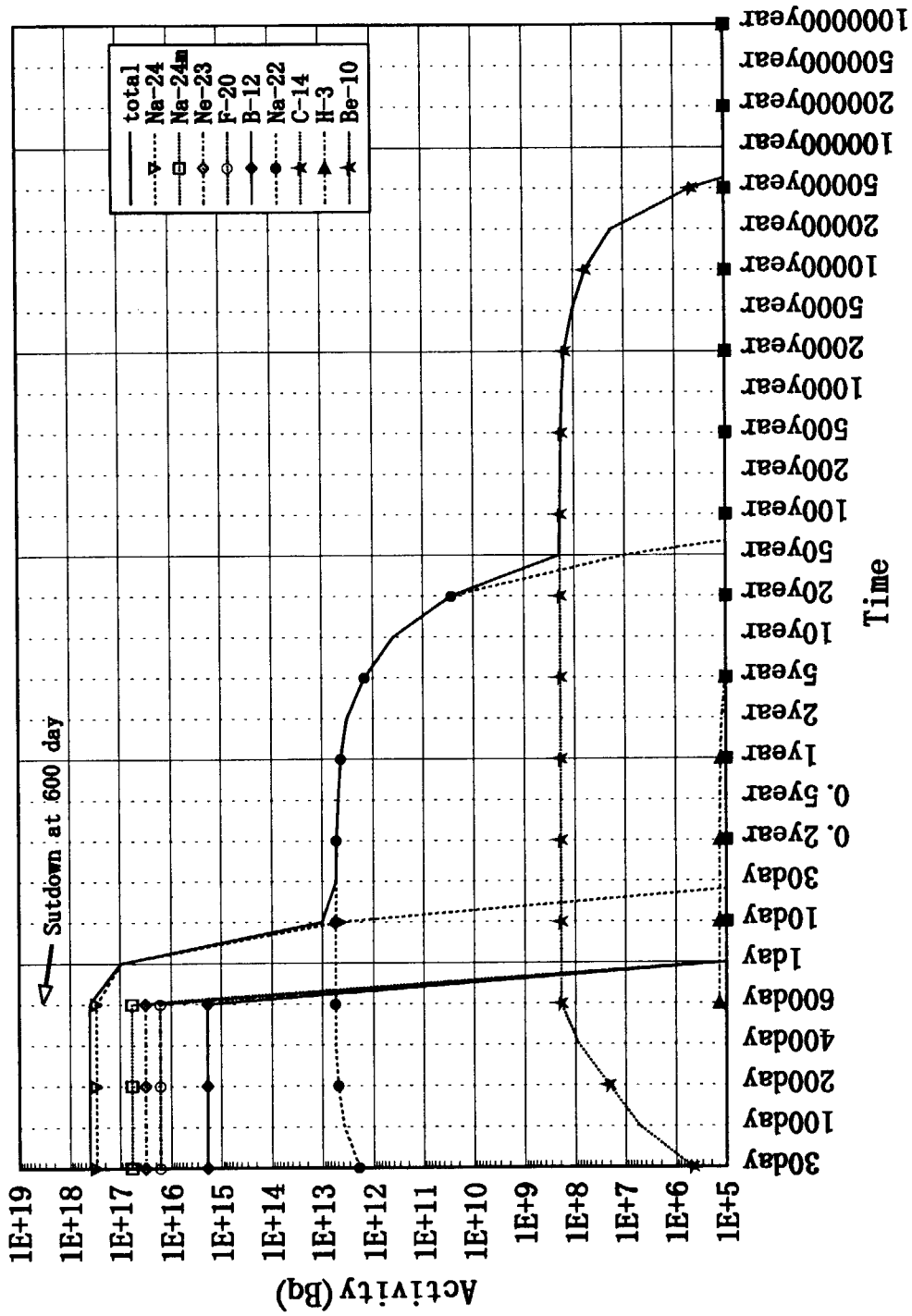


Fig. 11: Activity of activation product from Na coolant irradiated by neutron during 600 days.

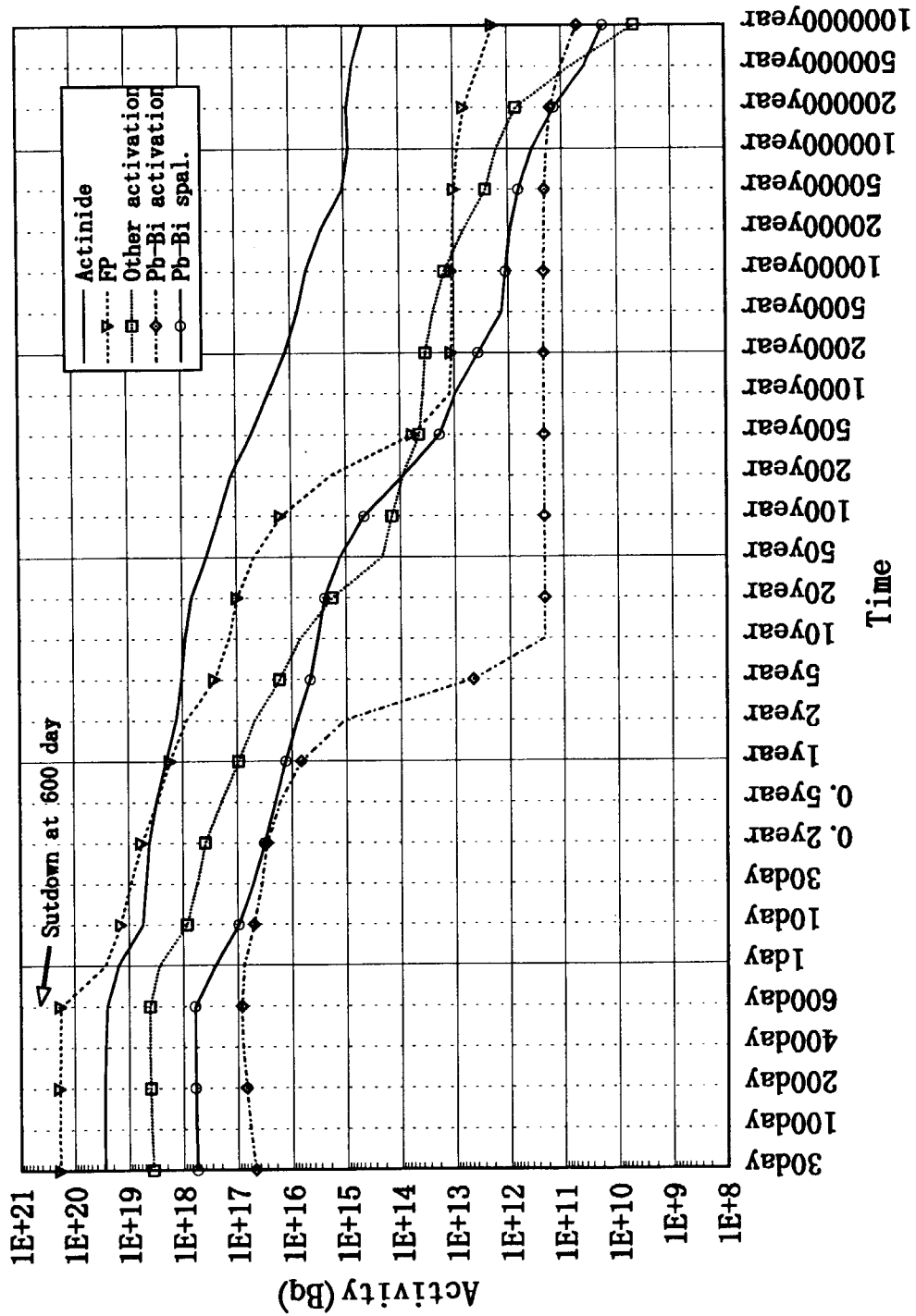


Fig. 12: Activity of SP and activation product from the Pb-Bi target ADS.

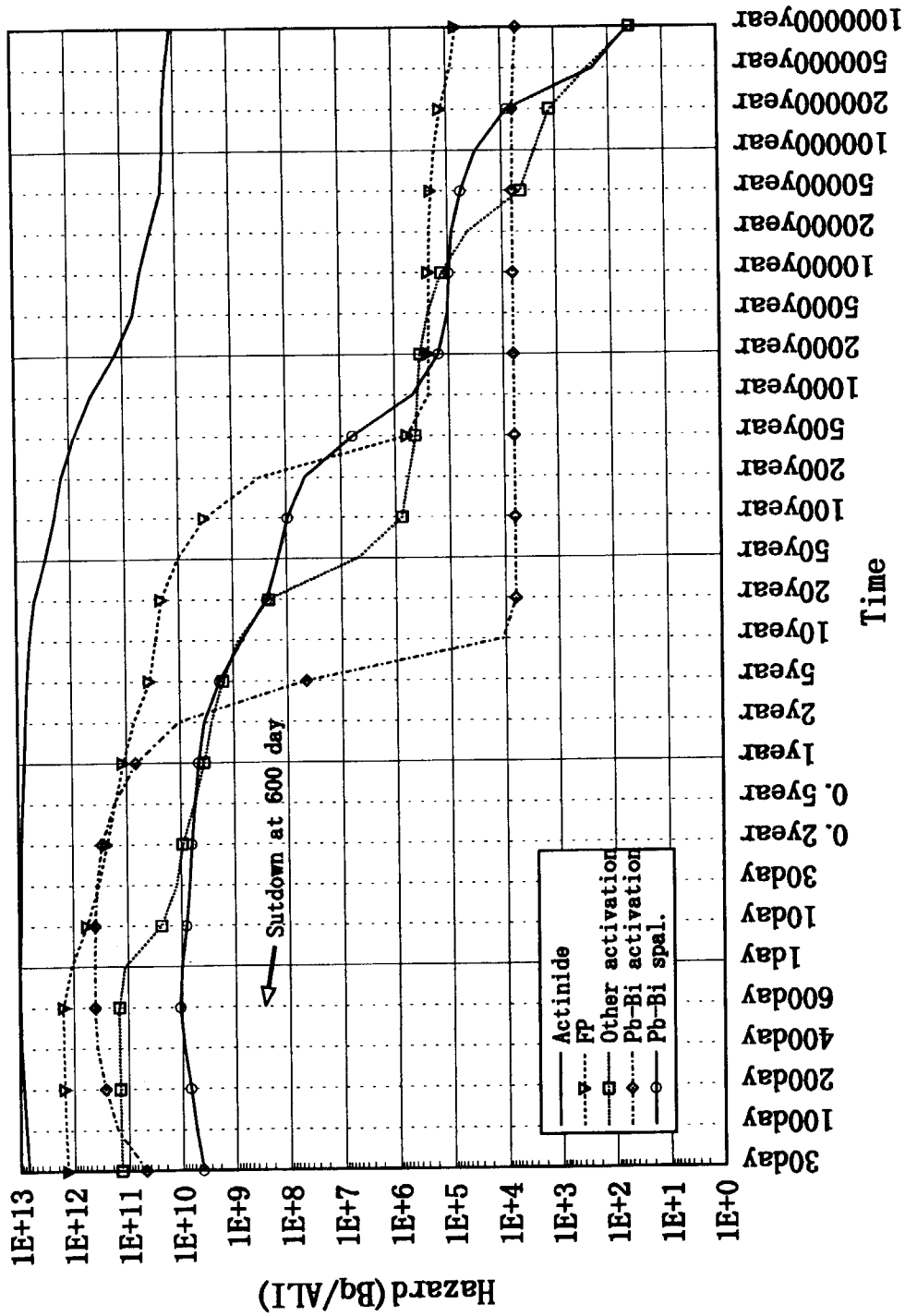


Fig. 13: Hazard of SP and activation product from the Pb-Bi target ADS.

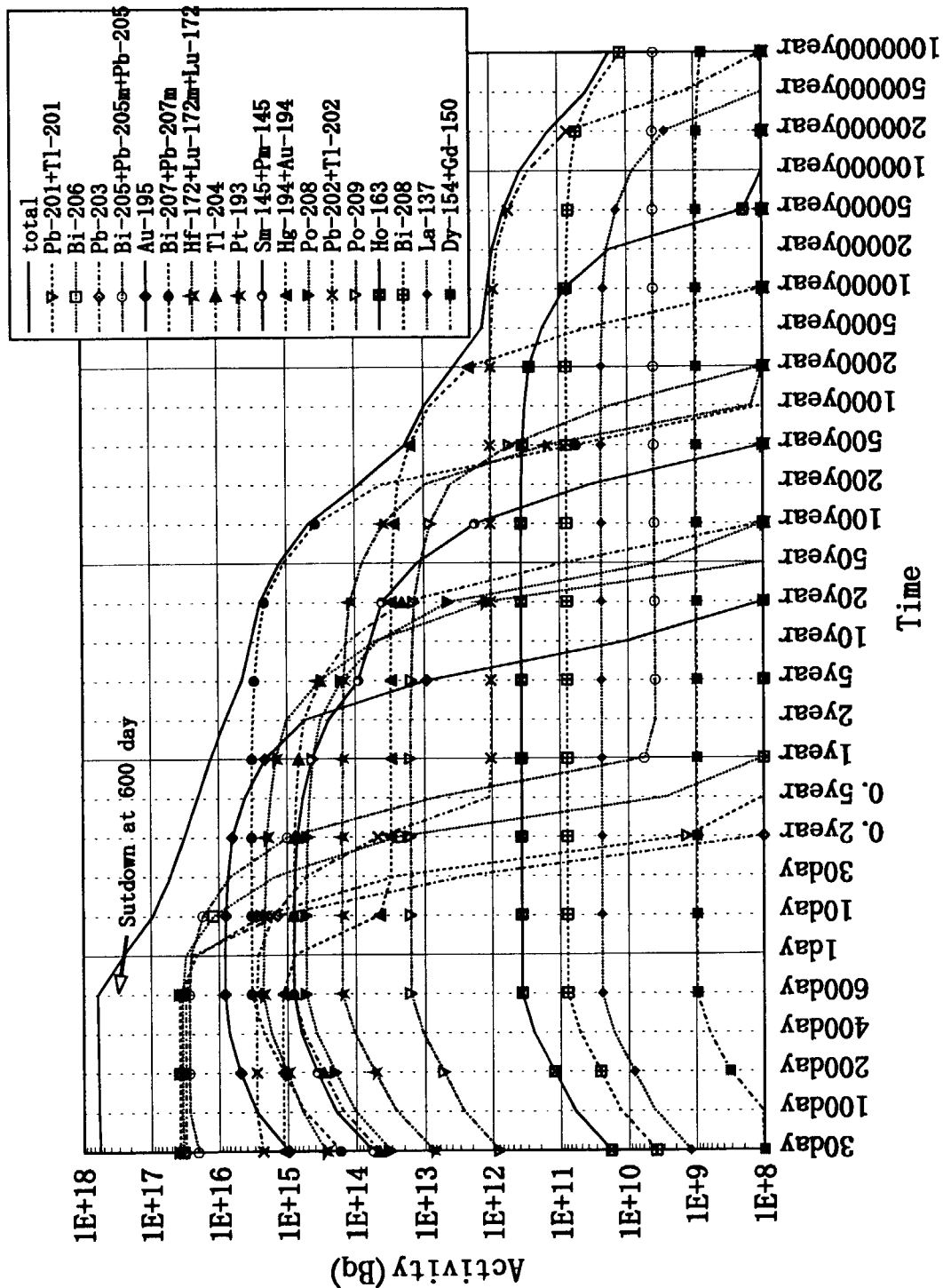


Fig. 14: Activity of SP from the Pb-Bi target irradiated by 25mA 1.5GeV proton beam during 600 days.

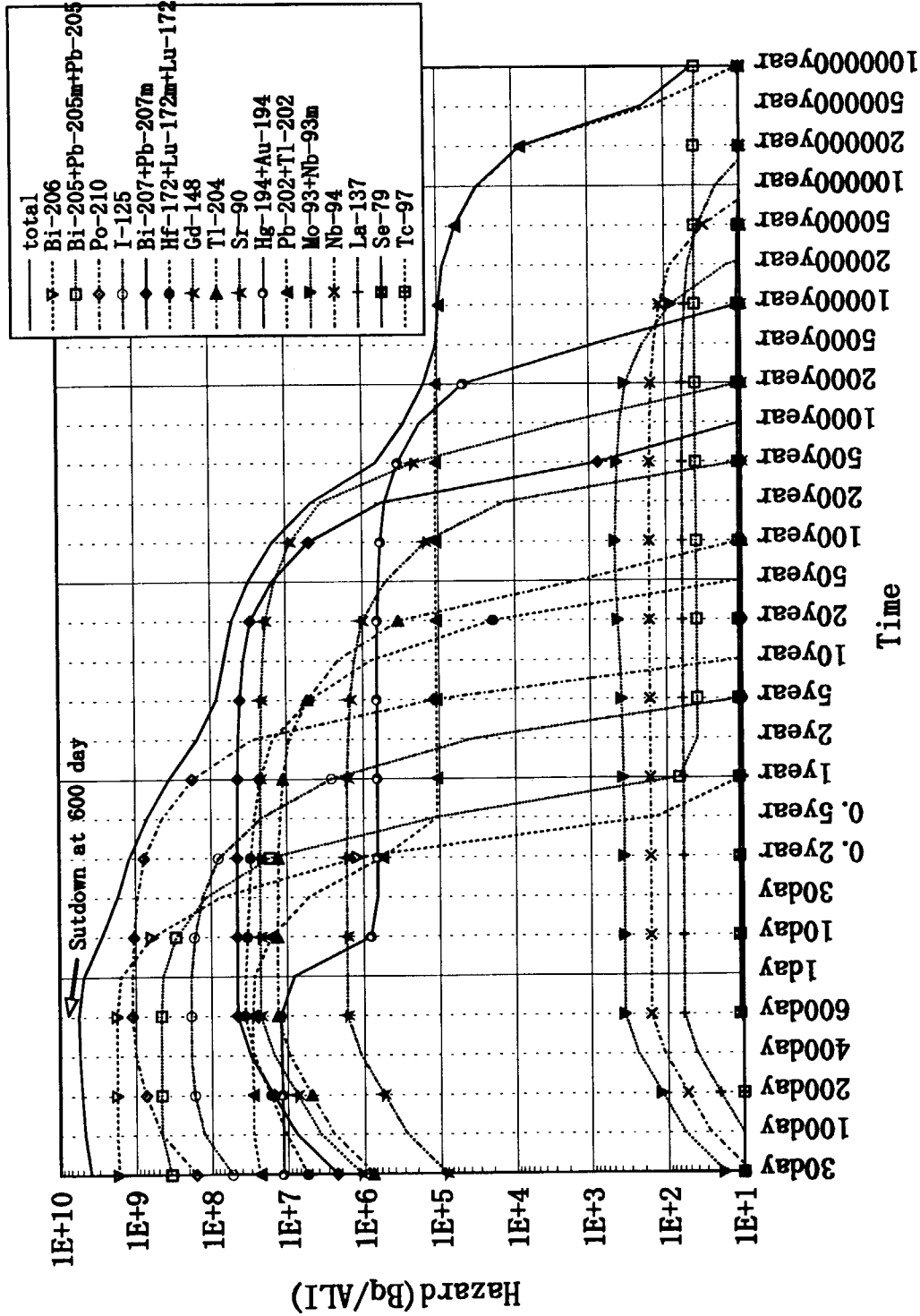


Fig. 15: Hazard of SP from the Pb-Bi target irradiated by 25mA 1.5GeV proton beam during 600 days.

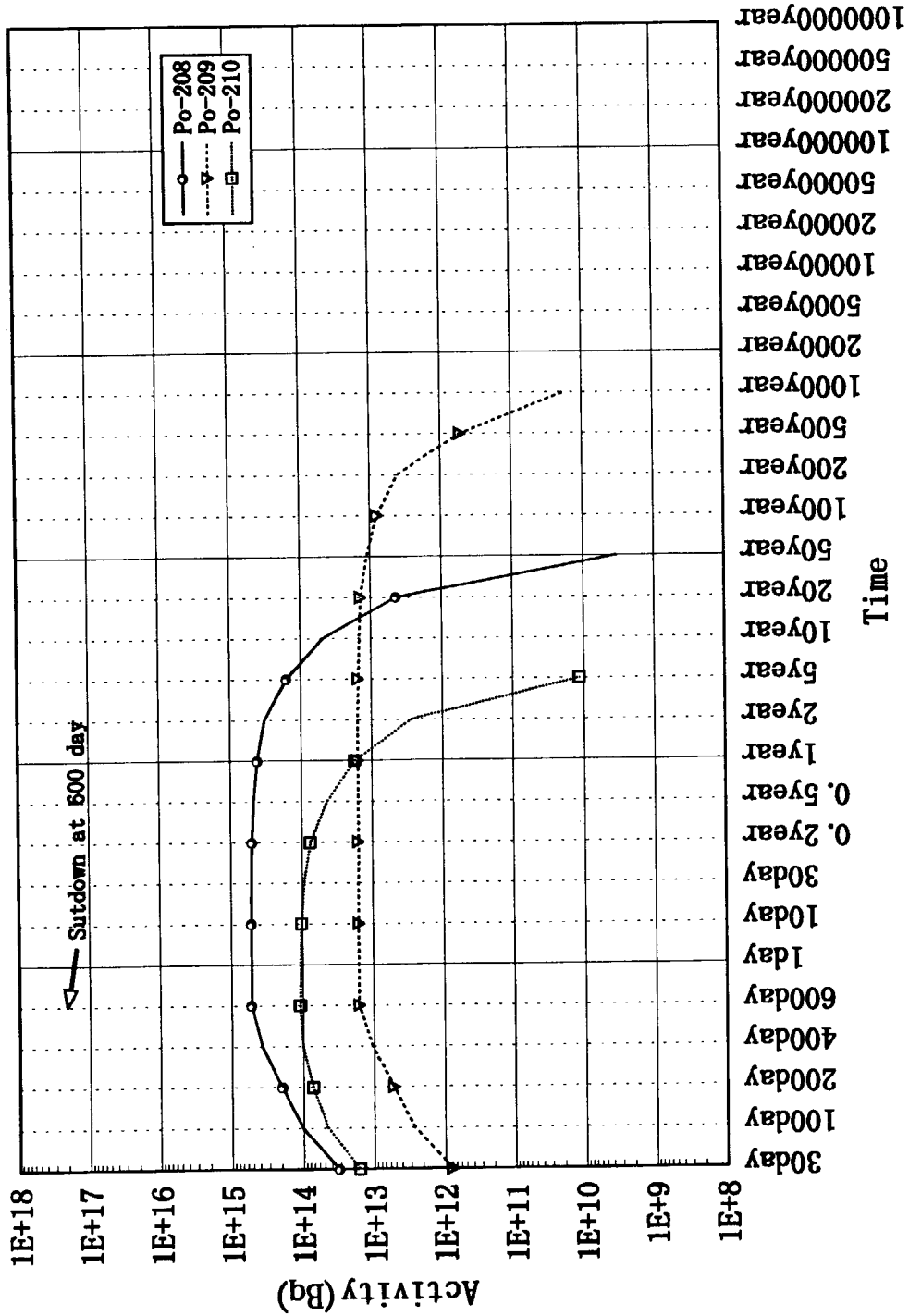


Fig. 16: Activity of Polonium SP from the Pb-Bi target irradiated by 25mA 1.5GeV proton beam during 600 days.



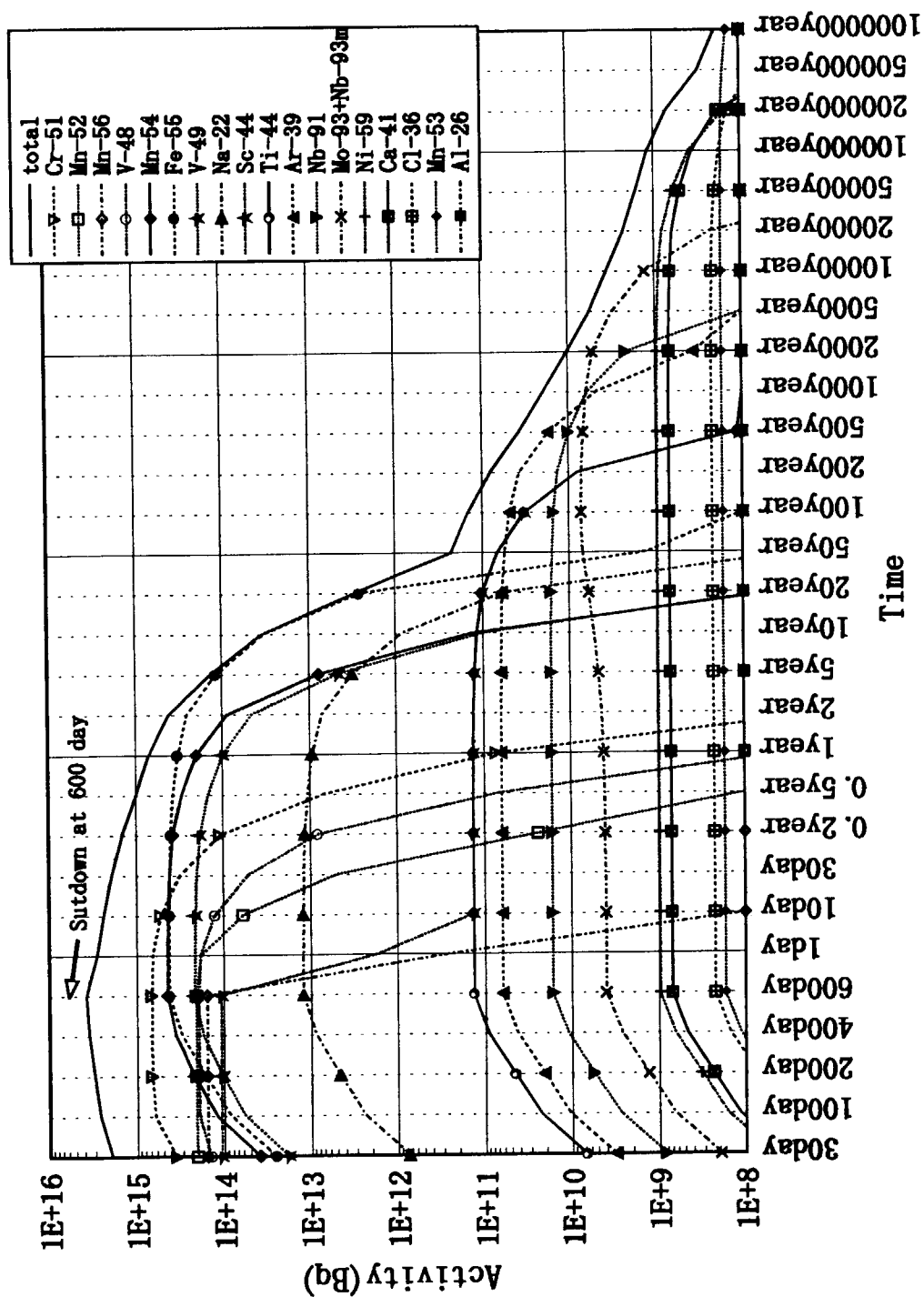


Fig. 17: Activity of SP from the target window irradiated by 25mA 1.5GeV proton beam during 600 days.

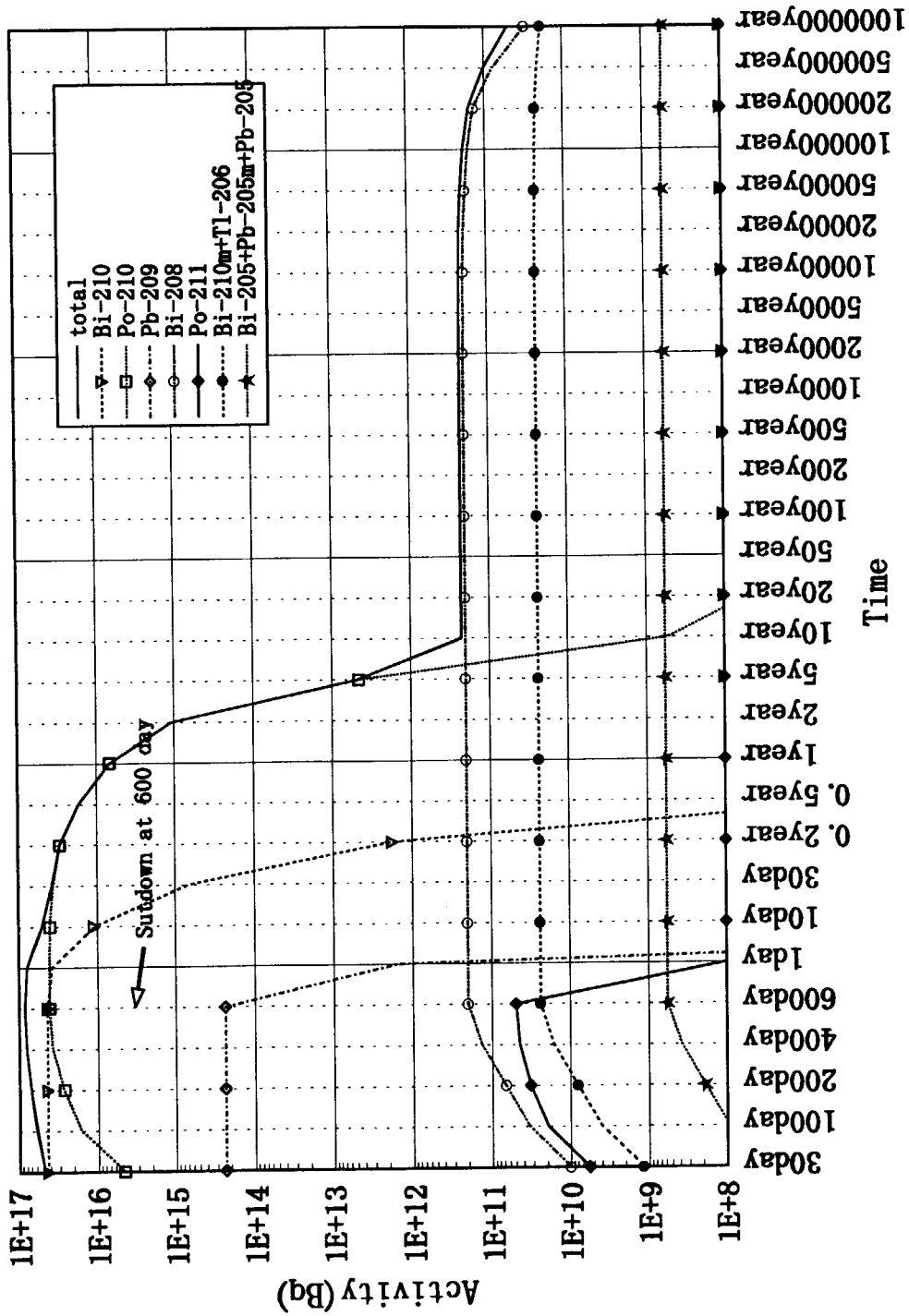


Fig. 18: Activity of activation product from the Pb-Bi target irradiated by neutron during 600 days.

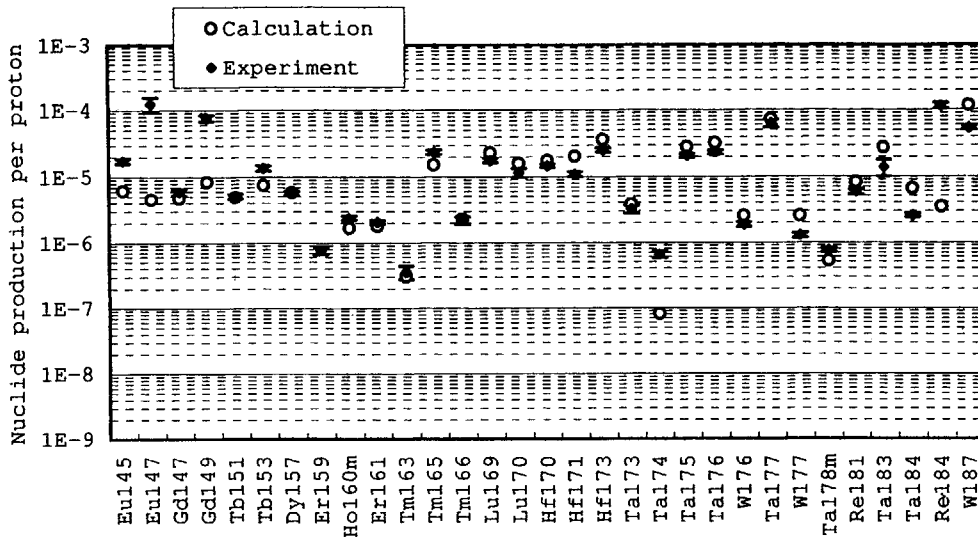


Fig. 19: The result and calculation of BNL experiment (W target).

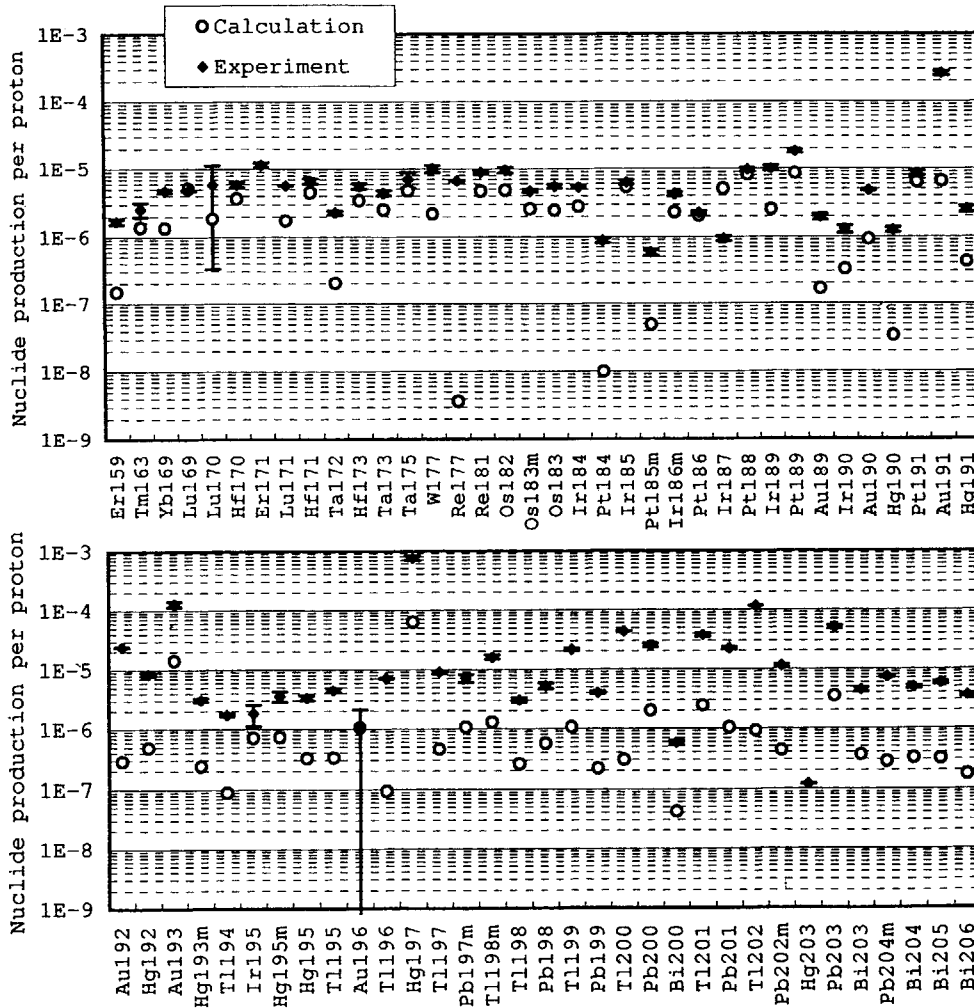


Fig. 20: The result and calculation of BNL experiment (Pb target).

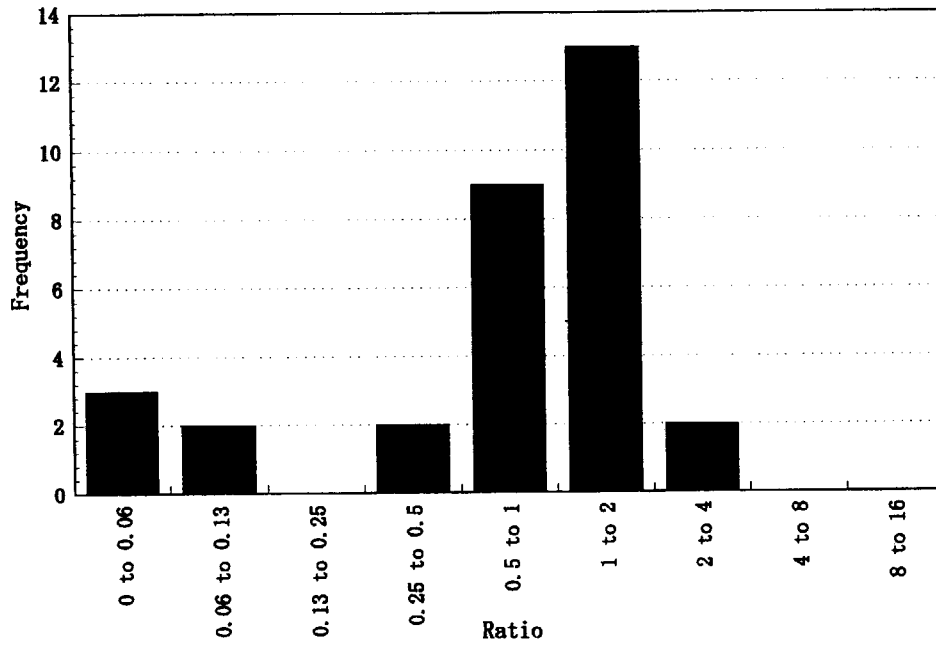


Fig. 21: Ratio of the calculations of NMTC and SPD to measured nuclide production in the W target.

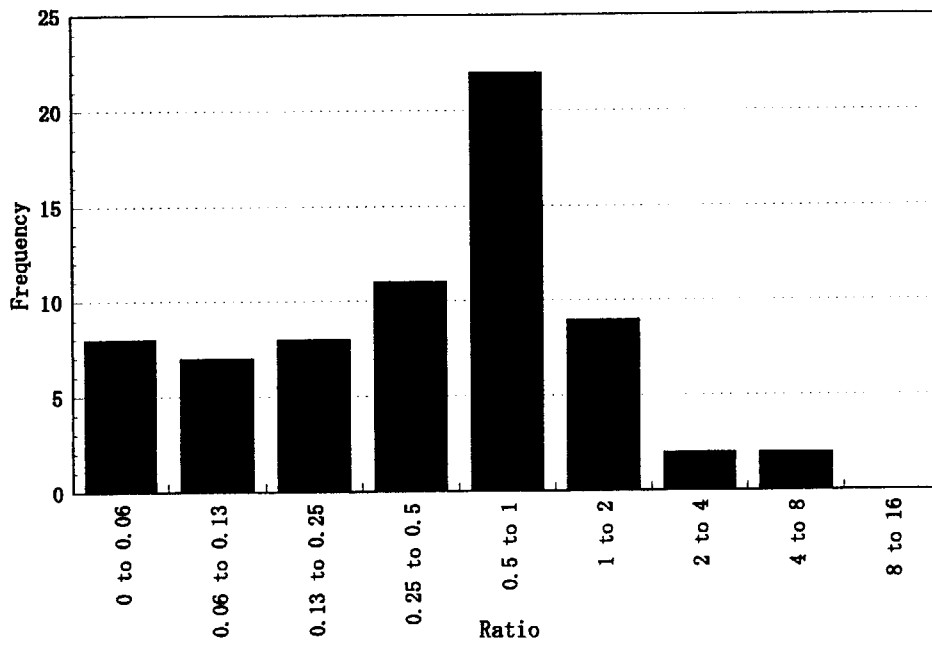


Fig. 22: Ratio of the calculations of NMTC and SPD to measured nuclide production in the Pb target.

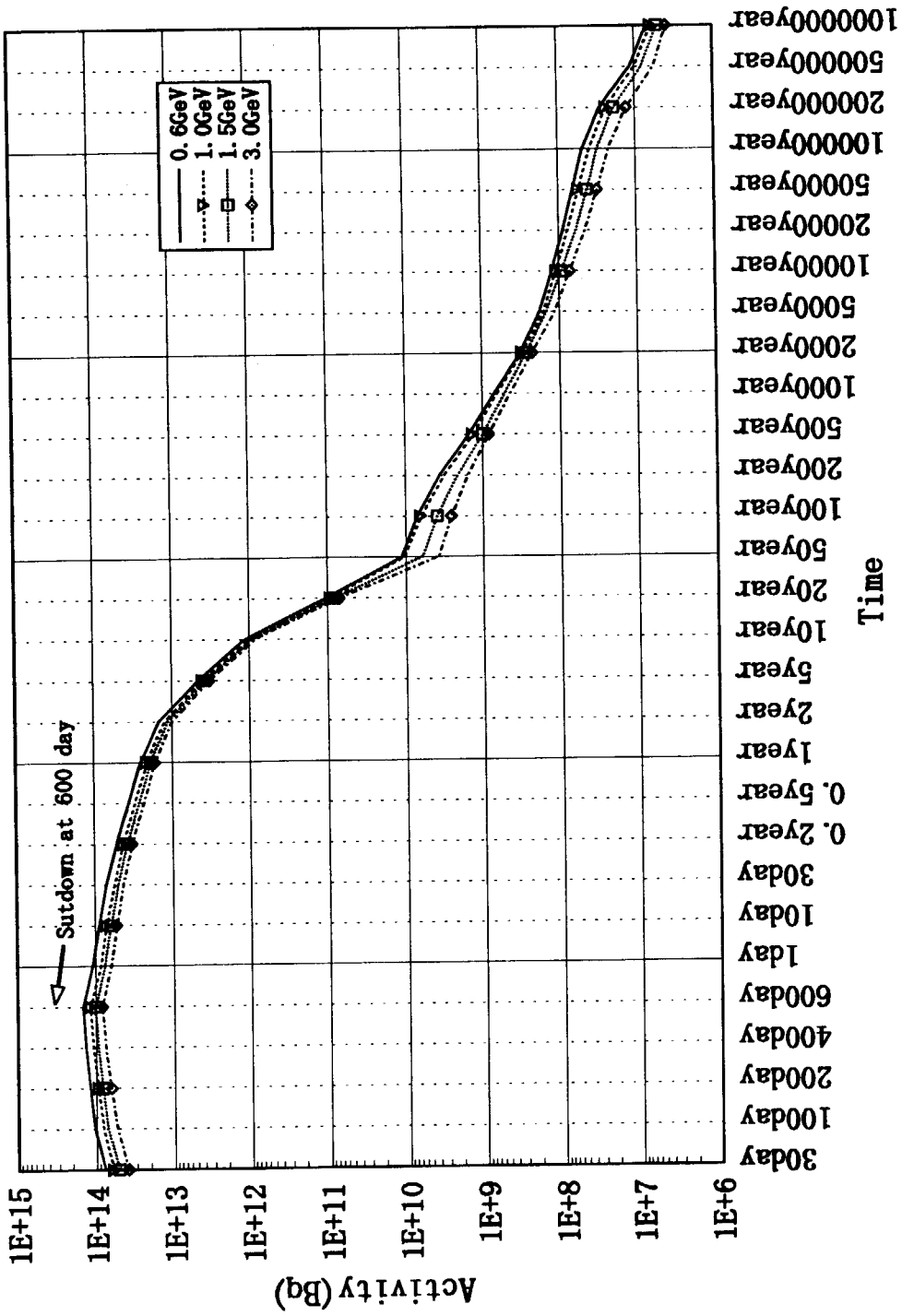


Fig. 23: Activity of SP from the target window irradiated by various energy proton beams.

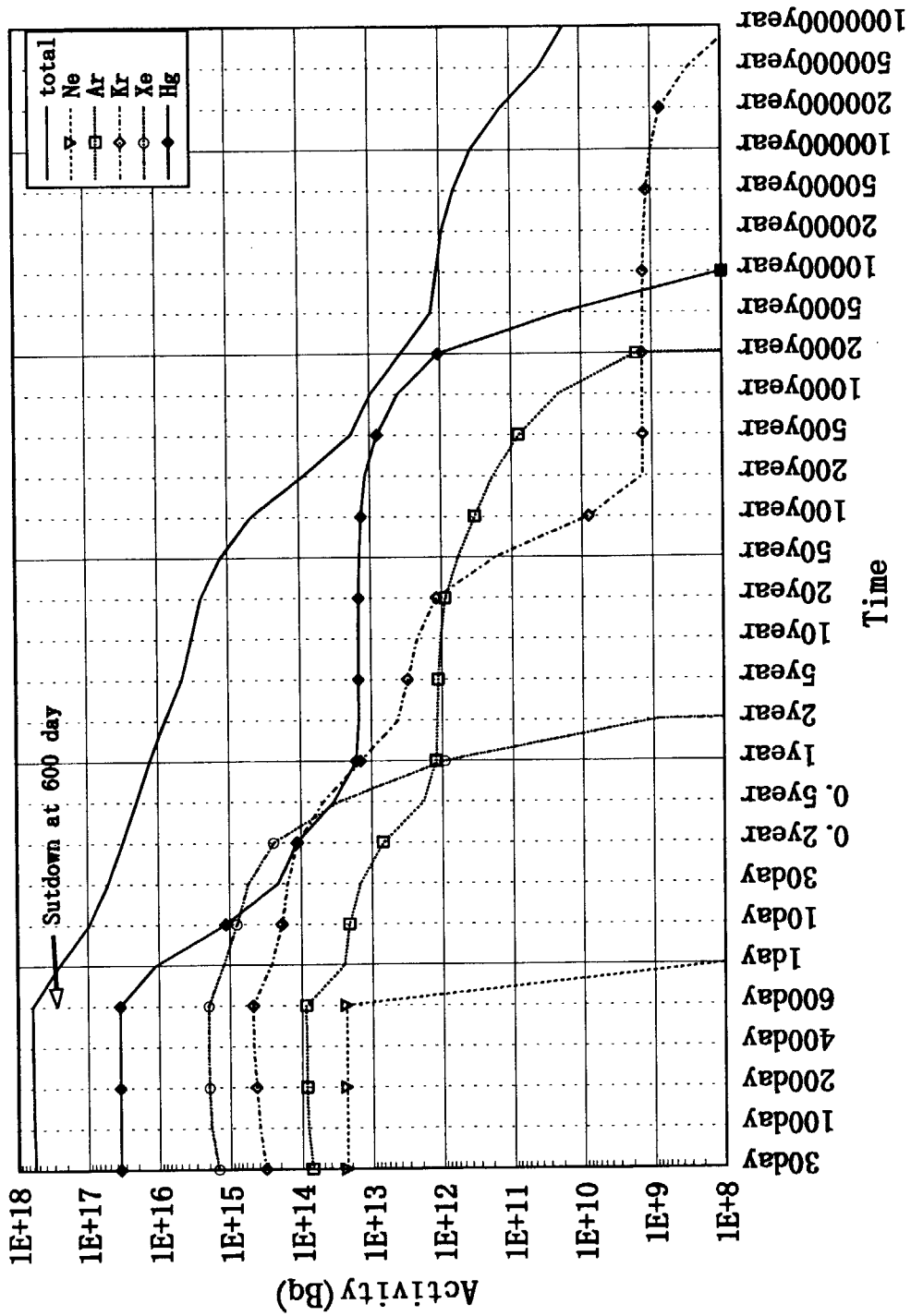


Fig. 24: Activity of volatile SP from the Pb-Bi target.

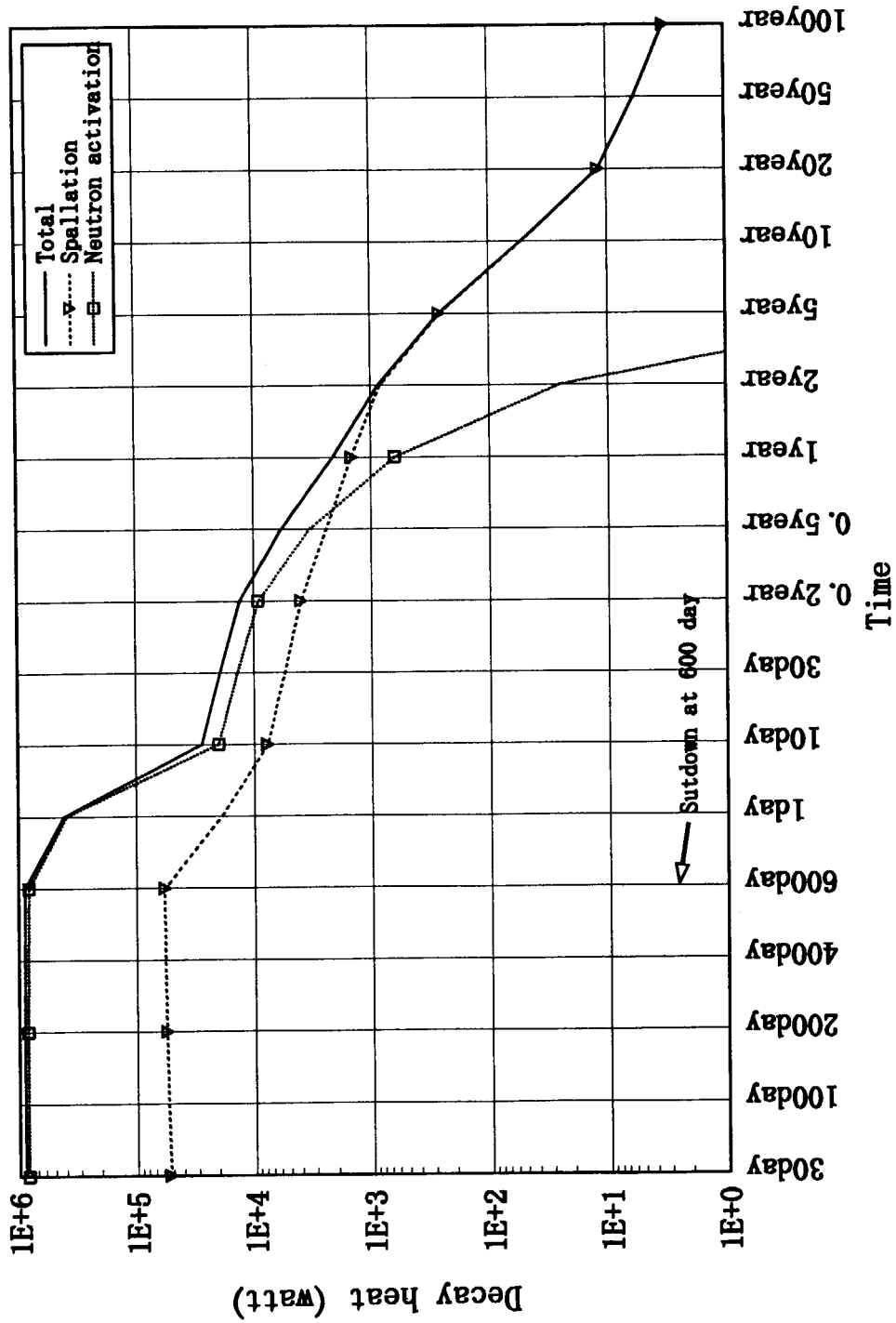


Fig. 25: Decay heat of W target.

This is a blank page.



# 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    | 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 <sup>-1</sup>     |
| 力             | ニュートン  | N  | m·kg/s <sup>2</sup> |
| 圧力, 応力        | パスカル   | Pa | N/m <sup>2</sup>    |
| 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 <sup>2</sup>   |
| 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 <sup>2</sup>   |
| 放射能           | ベクレル   | Bq | s <sup>-1</sup>     |
| 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<sup>-19</sup> J  
1 u = 1.66054 × 10<sup>-27</sup> 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   |
| バール      | 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<sup>-10</sup> m  
1 b = 100 fm<sup>2</sup> = 10<sup>-28</sup> m<sup>2</sup>  
1 bar = 0.1 MPa = 10<sup>5</sup> Pa  
1 Gal = 1 cm/s<sup>2</sup> = 10<sup>-2</sup> m/s<sup>2</sup>  
1 Ci = 3.7 × 10<sup>10</sup> Bq  
1 R = 2.58 × 10<sup>-4</sup> C/kg  
1 rad = 1 cGy = 10<sup>-2</sup> Gy  
1 rem = 1 cSv = 10<sup>-2</sup> Sv

表5 SI接頭語

| 倍数                | 接頭語  | 記号 |
|-------------------|------|----|
| 10 <sup>18</sup>  | エクサ  | E  |
| 10 <sup>15</sup>  | ペタ   | P  |
| 10 <sup>12</sup>  | テラ   | T  |
| 10 <sup>9</sup>   | ギガ   | G  |
| 10 <sup>6</sup>   | メガ   | M  |
| 10 <sup>3</sup>   | キロ   | k  |
| 10 <sup>2</sup>   | ヘクト  | h  |
| 10 <sup>1</sup>   | デカ   | da |
| 10 <sup>-1</sup>  | デシ   | d  |
| 10 <sup>-2</sup>  | センチ  | c  |
| 10 <sup>-3</sup>  | ミリ   | m  |
| 10 <sup>-6</sup>  | マイクロ | μ  |
| 10 <sup>-9</sup>  | ナノ   | n  |
| 10 <sup>-12</sup> | ピコ   | p  |
| 10 <sup>-15</sup> | フェムト | f  |
| 10 <sup>-18</sup> | 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, ヘクト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 <sup>5</sup> 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/m<sup>2</sup>) = 10 P (ポアズ) (g/(cm·s))

動粘度 1 m<sup>2</sup>/s = 10<sup>4</sup> St (ストークス) (cm<sup>2</sup>/s)

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

| エネルギー・仕事・熱量 | J (=10 <sup>7</sup> erg)    | kgf·m                       | kW·h                        | cal (計量法)                   | Btu                         | ft·lbf                      | eV                         | 1 cal = 4.18605 J (計量法)<br>= 4.184 J (熱化学)<br>= 4.1855 J (15 °C)<br>= 4.1868 J (国際蒸気表) |
|-------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|----------------------------|--|
|             | 1                           | 0.101972                    | 2.77778 × 10 <sup>-7</sup>  | 0.238889                    | 9.47813 × 10 <sup>-4</sup>  | 0.737562                    | 6.24150 × 10 <sup>18</sup> |  |
|             | 9.80665                     | 1                           | 2.72407 × 10 <sup>-6</sup>  | 2.34270                     | 9.29487 × 10 <sup>-3</sup>  | 7.23301                     | 6.12082 × 10 <sup>19</sup> |  |
|             | 3.6 × 10 <sup>6</sup>       | 3.67098 × 10 <sup>5</sup>   | 1                           | 8.59999 × 10 <sup>5</sup>   | 3412.13                     | 2.65522 × 10 <sup>6</sup>   | 2.24694 × 10 <sup>25</sup> |  |
|             | 4.18605                     | 0.426858                    | 1.16279 × 10 <sup>-6</sup>  | 1                           | 3.96759 × 10 <sup>-3</sup>  | 3.08747                     | 2.61272 × 10 <sup>19</sup> | 仕事率 1 PS (仏馬力)   |
|             | 1055.06                     | 107.586                     | 2.93072 × 10 <sup>-4</sup>  | 252.042                     | 1                           | 778.172                     | 6.58515 × 10 <sup>21</sup> | = 75 kgf·m/s   |
|             | 1.35582                     | 0.138255                    | 3.76616 × 10 <sup>-7</sup>  | 0.323890                    | 1.28506 × 10 <sup>-3</sup>  | 1                           | 8.46233 × 10 <sup>18</sup> | = 735.499 W  |
|             | 1.60218 × 10 <sup>-19</sup> | 1.63377 × 10 <sup>-20</sup> | 4.45050 × 10 <sup>-26</sup> | 3.82743 × 10 <sup>-20</sup> | 1.51857 × 10 <sup>-22</sup> | 1.18171 × 10 <sup>-19</sup> | 1                          |  |

| 放射能 | Bq                     | Ci                          |
|-----|------------------------|-----------------------------|
|     | 1                      | 2.70270 × 10 <sup>-11</sup> |
|     | 3.7 × 10 <sup>10</sup> | 1                           |

| 吸収線量 | Gy   | rad |
|------|------|-----|
|      | 1    | 100 |
|      | 0.01 | 1   |

| 照射線量 | C/kg                    | R    |
|------|-------------------------|------|
|      | 1                       | 3876 |
|      | 2.58 × 10 <sup>-4</sup> | 1    |

| 線量当量 | Sv   | rem |
|------|------|-----|
|      | 1    | 100 |
|      | 0.01 | 1   |

加速器核変換システム用核破砕ターゲットからの核破砕生成物の放射能と毒性評価