



JAEA-Data/Code

2025-011

DOI:10.11484/jaea-data-code-2025-011

FNSでの実験で使われたベリリウムブロックの 結晶粒径測定とFNSベリリウム積分実験再解析

Crystallite Domain Size Measurement of Beryllium Block Used in Experiments at FNS
and Re-analysis of FNS Beryllium Integral Experiment

今野 力

Chikara KONNO

原子力科学研究所

原子力基礎工学研究センター

Nuclear Science and Engineering Center

Nuclear Science Research Institute

October 2025

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

JAEA-Data/Code

本レポートは国立研究開発法人日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。
本レポートはクリエイティブ・コモンズ 表示 4.0 国際 ライセンスの下に提供されています。
本レポートの成果（データを含む）に著作権が発生しない場合でも、同ライセンスと同様の
条件で利用してください。（<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ja>）
なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ウェブサイト（<https://www.jaea.go.jp>）
より発信されています。本レポートに関しては下記までお問合せください。

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 研究開発推進部 科学技術情報課
〒 319-1112 茨城県那珂郡東海村大字村松 4 番地 49
E-mail: ird-support@jaea.go.jp

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency.

This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License
(<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.en>).

Even if the results of this report (including data) are not copyrighted, they must be used under
the same terms and conditions as CC-BY.

For inquiries regarding this report, please contact Library, Institutional Repository and INIS Section,
Research and Development Promotion Department, Japan Atomic Energy Agency.

4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1112, Japan

E-mail: ird-support@jaea.go.jp

FNS での実験で使われたベリリウムブロックの結晶粒径測定と FNS ベリリウム積分実験再解析

日本原子力研究開発機構 原子力科学研究所
原子力基礎工学研究センター
今野 力

(2025 年 8 月 22 日受理)

35 年ほど前に日本原子力研究開発機構 FNS で行われた DT 中性子源を用いたベリリウム積分実験で、 ${}^6\text{Li}(\text{n},\alpha)\text{T}$ 、 ${}^{197}\text{Au}(\text{n},\gamma){}^{198}\text{Au}$ 、 ${}^{235}\text{U}(\text{n},\text{fission})$ 反応の反応率の計算値が実験値を過大評価する問題が依然解決していない。最近、ヨーロッパの核破砕中性子源(ESS)のグループが消衰効果によりベリリウムの結晶粒径の大きさに熱中性子散乱データが大きく変わることを発表し、これらのデータを使うと FNS のベリリウム積分実験での ${}^6\text{Li}(\text{n},\alpha)\text{T}$ 、 ${}^{197}\text{Au}(\text{n},\gamma){}^{198}\text{Au}$ 、 ${}^{235}\text{U}(\text{n},\text{fission})$ 反応の反応率の計算値の過大評価を改善できる可能性がある。FNS のベリリウム積分実験で使ったベリリウムブロックの結晶粒径のデータは測定されていないため、今回、その結晶粒径を ASTM E112-13 に準じた方法で測定した。その結果、ベリリウムの平均結晶粒径は $27.3 \pm 1.7 \mu\text{m}$ であることがわかった。また、このデータを踏まえて、FNS のベリリウム積分実験の再解析も行った。

**Crystallite Domain Size Measurement of Beryllium Block Used in Experiments
at FNS and Re-analysis of FNS Beryllium Integral Experiment**

Chikara KONNO

Nuclear Science and Engineering Center
Nuclear Science Research Institute
Japan Atomic Energy Agency
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received August 22, 2025)

A beryllium integral experiment with DT neutrons at JAEA/FNS was performed 35 years ago. Various analyses of the experiment have shown that calculated reaction rates of the ${}^6\text{Li}(\text{n},\alpha)\text{T}$, ${}^{197}\text{Au}(\text{n},\gamma){}^{198}\text{Au}$ and ${}^{235}\text{U}(\text{n},\text{fission})$ reactions, which are sensitive to low energy neutrons, overestimate the measured ones. Recently, European Spallation Neutron Source (ESS) group presented that the thermal scattering law data of beryllium change depending on crystallite domain size of beryllium metal due to the extinction effect. If the data are applied to the analysis of the FNS beryllium integral experiment, the overestimation problem may be solved. However, crystallite domain size of beryllium block used in the experiment has not been measured. Here, it was measured as $27.3 \pm 1.7 \mu\text{m}$ with the method based on ASTM E112-13. Then the FNS beryllium integral experiment was re-analyzed based on the data.

Keywords: Beryllium, FNS, Crystallite Domain Size, Thermal Scattering Law Data

目 次

1. 序論	1
2. 測定	2
2.1 サンプル	2
2.2 測定準備	2
2.3 結晶粒径測定方法	2
2.4 結晶粒径測定結果	3
3. FNS ベリリウム積分実験再解析	6
4. まとめ	8
謝辞	9
参考文献	9
付録 FNS ベリリウム積分実験解析のための MCNP 入力例	11

Contents

1. Introduction	1
2. Measurement	2
2.1 Sample	2
2.2 Preparation	2
2.3 Measuring method of crystallite domain size	2
2.4 Measurement result of crystallite domain size	3
3. Re-analysis of FNS beryllium experiment	6
4. Summary	8
Acknowledgements	9
References	9
Appendix Example of MCNP input for FNS beryllium experiment	11

表リスト

Table 2.1	ベリリウム結晶粒径測定結果	5
-----------	---------------	---

図リスト

Fig. 1	ESS のグループが評価した ^9Be の全断面積	1
Fig. 2.1	切断要領	2
Fig. 2.2	研磨面	2
Fig. 3.1	$^6\text{Li}(n,\alpha)\text{T}$ 反応の反応率の C/E	6
Fig. 3.2	$^{197}\text{Au}(n,\gamma)^{198}\text{Au}$ 反応の反応率の C/E	7
Fig. 3.3	$^{235}\text{U}(n,\text{fission})$ 反応の反応率の C/E	7

写真リスト

Photo 2.1	サンプル外観写真	2
Photo 2.2	ベリリウムの顕微鏡拡大写真	4

1. 序論

ベリリウムは原子炉の反射材、核融合炉での中性子増倍材として使われ、原子力分野では重要な物質の一つである。ベリリウムの核データは原子炉、核融合炉の核設計等に大きな影響を与えるため、ベリリウムの核データの精度検証のための実験が行われてきた¹⁻⁹⁾。筆者は35年ほど前に日本原子力研究開発機構（当時は、日本原子力研究所）FNSで行われたDT中性子源を用いたベリリウム積分実験²⁾に参加した。この実験の解析をこれまでにモンテカルロコードMCNP¹⁰⁾で行ってきたが、最新の核データライブラリを用いても低エネルギー中性子に大きな感度のある ${}^6\text{Li}(n,\alpha)\text{T}$ 、 ${}^{197}\text{Au}(n,\gamma){}^{198}\text{Au}$ 、 ${}^{235}\text{U}(n,\text{fission})$ 反応の反応率の計算値が実験値を過大評価する問題が未解決のままである¹¹⁾。

15年ほど前、ベリリウムの熱中性子散乱則データを大きく変えると、このFNSのベリリウム積分実験での ${}^6\text{Li}(n,\alpha)\text{T}$ 、 ${}^{197}\text{Au}(n,\gamma){}^{198}\text{Au}$ 、 ${}^{235}\text{U}(n,\text{fission})$ 反応の反応率の計算値の過大評価が改善することを指摘した¹²⁾が、ベリリウムの熱中性子散乱則データを大きく変える根拠が見つからず、核データに反映することができなかった。最近、ヨーロッパ核破砕中性子源(European Spallation Source, ESS)のグループが消衰効果によりベリリウムの結晶粒径の大きさに熱中性子散乱則データが大きく変わることを発表した¹³⁻¹⁴⁾。その全断面積をFig. 1に示す（「消衰効果考慮なし」がこれまでの全断面積とほぼ同じ）。これらのデータを使うとFNSのベリリウム積分実験での ${}^6\text{Li}(n,\alpha)\text{T}$ 、 ${}^{197}\text{Au}(n,\gamma){}^{198}\text{Au}$ 、 ${}^{235}\text{U}(n,\text{fission})$ 反応の反応率の計算値の過大評価を改善できる可能性がでてきた。しかし、FNSのベリリウム積分実験で使ったベリリウムブロックの結晶粒径は測定されていない。そこで今回、FNSのベリリウム積分実験で使ったベリリウムブロックの結晶粒径を測定した。また、ESSのデータを用いてFNSのベリリウム積分実験の再解析も行った。

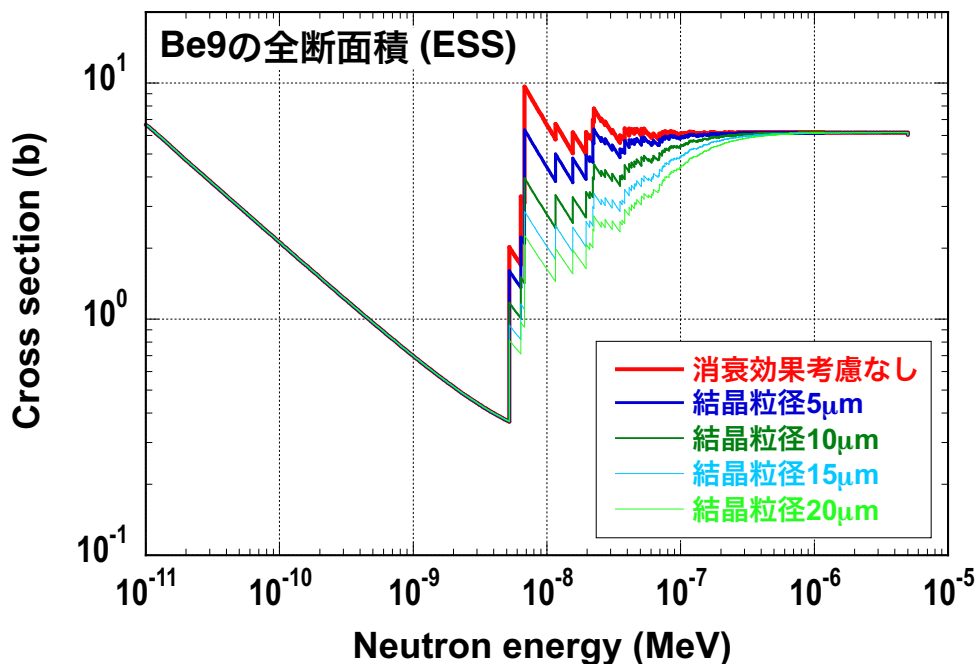


Fig. 1 ESSのグループが評価した ${}^9\text{Be}$ の全断面積

2. 測定

ベリリウムの結晶粒径の測定は、ASTM E112-13 のインターセプト法¹⁵⁾を採用し、光学顕微鏡でベリリウム表面の拡大写真を撮って行った。写真撮影の前にベリリウムブロックの切断、研磨を行う必要があり、ベリリウムブロックの切断、研磨を国内で行うことができる場所は非常に限られていたため、その対応のできる(株)コベルコ科研で行った。

2.1 サンプル

サンプルは純ベリリウム板(寸法:□100 mm × 12.5 mm、Photo 2.1)である。

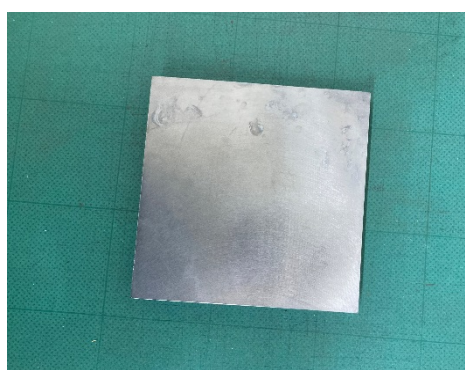


Photo 2.1 サンプル外観写真

2.2 測定準備

Fig. 2.1 に示すように、サンプルの純ベリリウム板から約 12.5 mm × 12.5 mm × 12.5 mm の試験片を 3 個切り出した(切断はウォータージェットで実施)。採取した試験片の X、Y、Z 面 (Fig. 2.2 参照)の各面が鏡面となるように研磨した。

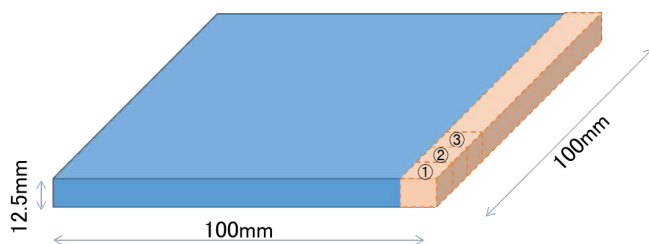


Fig. 2.1 切断要領

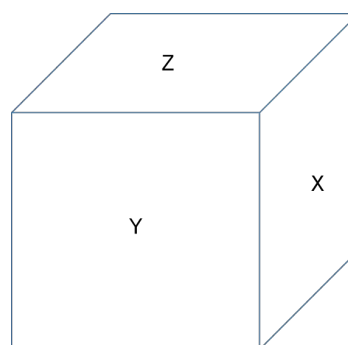


Fig. 2.2 研磨面

2.3 結晶粒径測定方法

結晶粒径測定は ASTM E112-13 のインターセプト法を参考に、200 倍の顕微鏡写真を 2 倍に引き伸ばして行った。具体的な測定手順は以下のとおりである。

1. 3 個ある試験片のうち、1 個は研磨した X 面、1 個は研磨した Y 面、1 個は研磨した Z 面を

光学顕微鏡 Nikon ECLIPSE LV150 でそれぞれ倍率 50 倍と 200 倍で拡大した写真を撮影した。

2. 顕微鏡写真に規格で指定された大きさの円または直線を引き、その線と結晶粒界との交点の数を数えた。
3. 引いた線のトータルの長さを L 、線と結晶粒界との交点の数を N_a とし、以下の(2.1)式から線分長である ℓ を求め、以下の(2.2)式より粒度番号を求めた。

$$\ell = (L/M) \div N_a \quad (2.1)$$

$$G(\text{粒度番号}) = -6.643856 \times \log(\ell) - 3.288 \quad (2.2)$$

L : インターセプト法に使用した評価長さ[mm]

M : 観察倍率

N_a : 試験線が通過または捕捉した結晶粒数

ℓ : 結晶粒内を横切る試験線の 1 結晶粒あたりの線分長[mm]

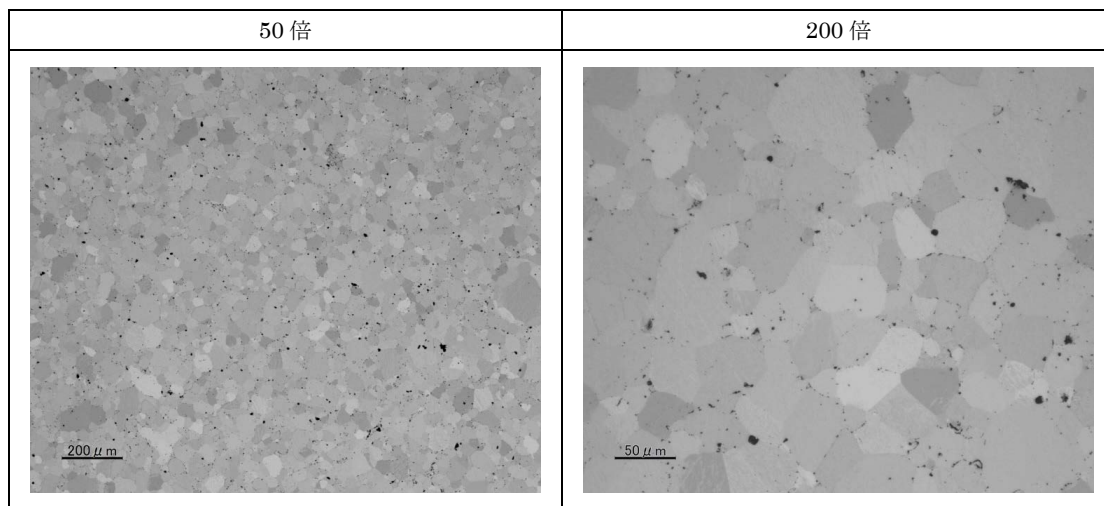
4. 以下の(2.3)式から N_b の値(観察した試験面の 1 mm² あたりの結晶粒数)を逆算し、 $d(\text{結晶粒径}) = 1/\sqrt{N_b}$ から結晶粒径を算出した。

$$G(\text{粒度番号}) = -2.9542 + 3.3219 \times \log(N_b) \quad (2.3)$$

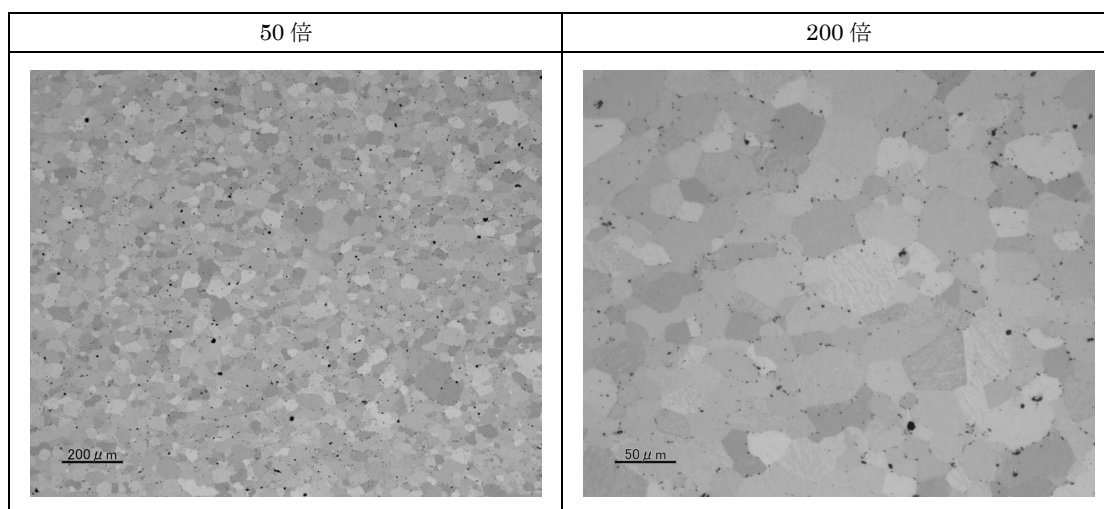
N_b : 観察した試験面の 1 mm² あたりの結晶粒数

2.4 結晶粒径測定結果

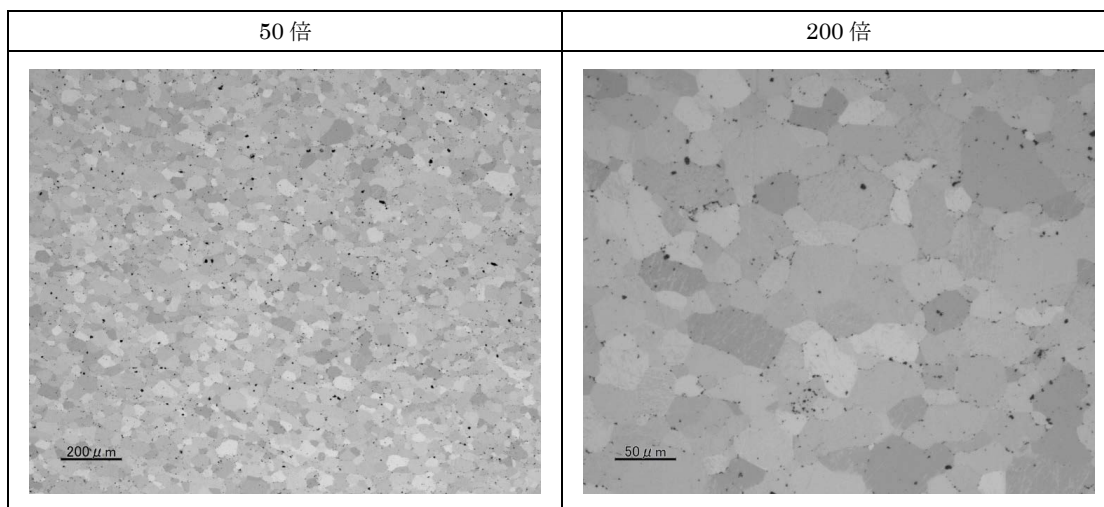
Photo 2.2 にベリリウムの顕微鏡拡大写真を、Table 2.1 に結晶粒径測定結果を示す(結晶粒径の誤差は X、Y、Z 面のそれぞれの結晶粒径データから算出)。顕微鏡拡大写真内の細かい黒い隙間は焼結による空隙と考えられる。50 倍の顕微鏡拡大写真では、部分的に 100 μm 以上の粗大な粒が観察された。そのため、結晶粒径測定用の 200 倍の顕微鏡拡大写真は、粗大な粒が視野に含まれない平均的な視野を選んで撮影した。X、Y、Z 面で結晶粒径にほとんど差は認められなかった。



(a) X 面の写真



(b) Y 面の写真



(c) Z 面の写真

Photo 2.2 ベリリウムの顕微鏡拡大写真

Table 2.1 ベリリウム結晶粒径測定結果

試料名	純ベリリウム		
観察面	X	Y	Z
L [mm]	500	500	500
M	400	400	400
N _a	48	56	51
ℓ [mm]	0.02604	0.02232	0.02451
粒度番号	7.2	7.7	7.4
結晶粒径 [μm]	29.2	25.1	27.5
平均結晶粒径 [μm]	27.3		
平均結晶粒径誤差 [μm]	1.7		

※結晶粒径は粒度番号から計算した値

3. FNS ベリリウム積分実験再解析

FNS ベリリウム積分実験では JAEA/FNS の DT 中性子源から 200 mm の位置に平均半径 315 mm、厚さ 456 mm のベリリウム体系を設置して DT 中性子照射をし、ベリリウム体系の反応率、中性子スペクトルの測定を行った。実験の詳細は参考文献 2 を参照。

この実験の解析は 1 章で述べたように核データライブラリを変えてこれまで何度も行われてきた。今回、この実験の解析を JENDL-5¹⁶⁾と ESS のベリリウムの熱中性子散乱則データを用いて、MCNP6.2 コードで行った。

これまで計算値が実験値の不一致が問題になっていた低エネルギー中性子に感度のある ${}^6\text{Li}(n,\alpha)\text{T}$ 、 ${}^{197}\text{Au}(n,\gamma){}^{198}\text{Au}$ 、 ${}^{235}\text{U}(n,\text{fission})$ 反応の反応率の実験値に対する計算値の比(C/E)を Figs. 3.1 から 3.3 に示す。ベリリウムの結晶粒径が大きくなるにつれて計算値が小さくなり、結晶粒径が 15 μm であると計算値と実験値の一致が一番良くなるが、今回の測定値 27.3 μm に一番近い 20 μm では逆に計算値は実験値を 10%程度過小評価することがわかった。ESS のデータがないためはっきりしたことは言えないが、測定値 27.3 μm の場合、計算値は実験値をもっと過小評価すると思われる。今後、別の手法でのベリリウムの結晶粒径測定やベリリウム熱中性子散乱則データ測定等を通じて、FNS ベリリウム積分実験での計算値と実験値の不一致の原因を調査することが望まれる。

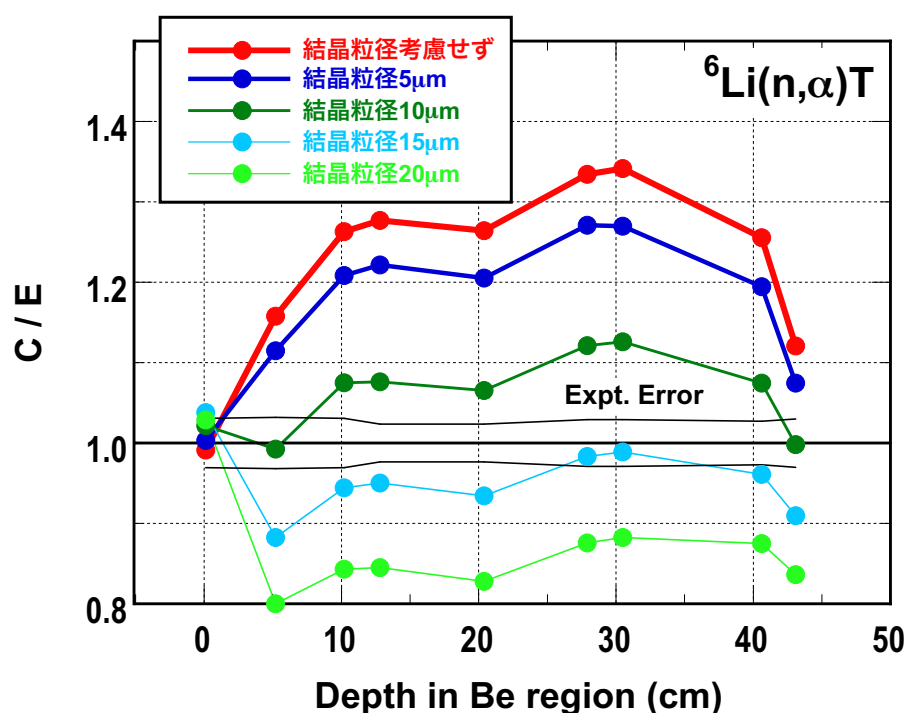
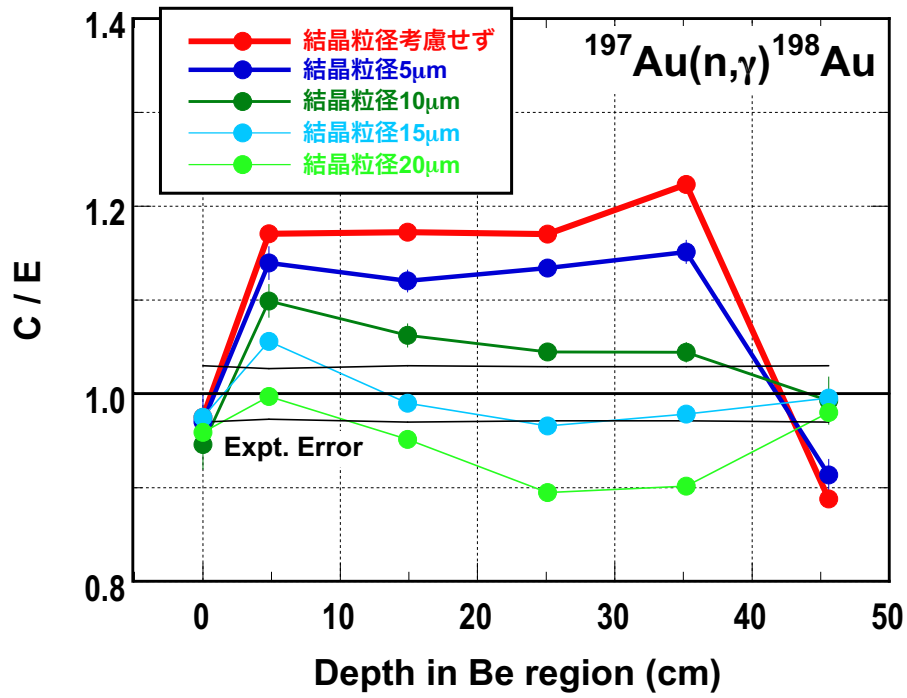
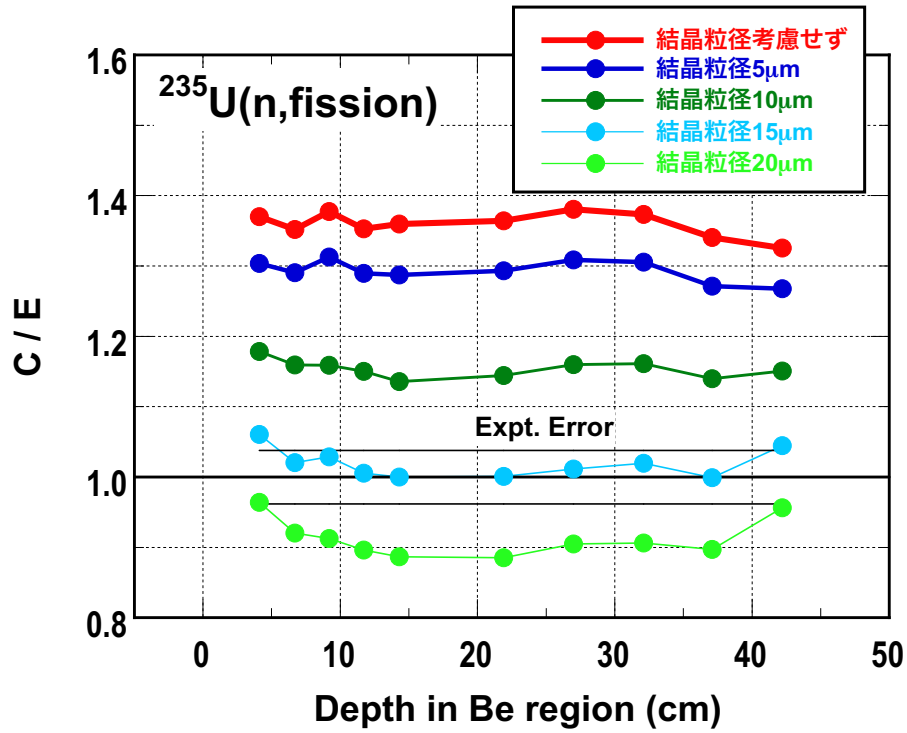


Fig. 3.1 ${}^6\text{Li}(n,\alpha)\text{T}$ 反応の反応率の C/E

Fig. 3.2 $^{197}\text{Au}(n,\gamma)^{198}\text{Au}$ 反応の反応率の C/EFig. 3.3 $^{235}\text{U}(n,\text{fission})$ 反応の反応率の C/E

4. まとめ

ベリリウムの熱中性子散乱則データが結晶粒径により大きく変わることが判明したことをうけ、FNS ベリリウム積分実験で用いたベリリウムブロックの結晶粒径を ASTM E112-13 のインターセプト法で測定した。その結果、ベリリウムブロックの平均結晶粒径が $27.3 \pm 1.7 \mu\text{m}$ であることがわかった。FNS ベリリウム積分実験の解析を JENDL-5 と結晶粒径で変わる ESS のベリリウム熱中性子散乱則データを使って解析したところ、これまで計算値が実験値を過大評価していた低エネルギー中性子に感度のある ${}^6\text{Li}(\text{n},\alpha)\text{T}$ 、 ${}^{197}\text{Au}(\text{n},\gamma){}^{198}\text{Au}$ 、 ${}^{235}\text{U}(\text{n},\text{fission})$ 反応の反応率は、ベリリウムの結晶粒径が大きくなるにつれて計算値が小さくなり、結晶粒径が $15 \mu\text{m}$ であると計算値と実験値の一致が一番良くなることがわかった。しかし、今回の測定値 $27.3 \mu\text{m}$ に一番近い $20 \mu\text{m}$ では逆に計算値は実験値を 10% 程度の過小評価になることがわかった。

謝 辞

今回の測定にあたり、(株)コベルコ科研の藤原サチオ氏、藤田貢輔氏には多大なご尽力をいただきました。また、(株)日本ガイシの坂本直樹氏にも貴重なご助言、ご支援をいただきました。さらに、ESS の D.D. DiJulio 氏には結晶粒径の異なるベリリウムの熱中性子散乱則データをご提供いただきました。ここに改めて感謝申し上げます。

参考文献

- 1) Oyama, Y., Maekawa, H., Measurement and analysis of an angular neutron flux on a beryllium slab irradiated with deuterium-tritium neutrons, Nucl. Sci. Eng., vol.97, 1987, pp.220-234.
- 2) Maekawa, H., Yamaguchi, S., Konno, C., Oyama, Y., Ikeda, Y., Sekiyama, K., Kosako, K., Benchmark Experiment and Analysis of a Beryllium Cylindrical Assembly, Fusion Technol., vol.19, 1991, pp.1949-1954.
- 3) Chen, Y., Chen, G., Rie, R., Guo, H., Chen, W., Shen, J., Experiments of neutron multiplication in beryllium, Fusion Technol., vol.19, 1991, pp.1919-1924.
- 4) Leshchenko, B. E., Onishchuk, Yu.N., Prokopets, G.A., Chuvilin, D.Yu., The Neutron Leakage Spectra from Beryllium and Aluminium Spheres for 14 MeV Neutron Source within the Energy Interval 6–15 MeV, Proceedings of an International Conference on Nuclear Data for Science and Technology, Forschungszentrum Jülich, Fed. Rep. of Germany, 13-17 May, 1991, pp.445-446.
- 5) von Möllendorff, U., Fischer, U., Fries, H., Giese, H., Kappler, F., Tayama, R., Tsukiyama, T., Wiegner, E., Measurement and analysis of neutron leakage spectra from beryllium spherical shells, Proceedings of the 17th Symposium on Fusion Technology, Rome, Italy, 14-18 September, 1992, pp.1537-1541.
- 6) Simakov, S.P., Androsenko, A.A., Androsenko, P.A., Devkin, B.V., Dubrovina, S.I., Kobozev, M.G., Lychagin, A.A., Talalaev, V.A., Chuvilin, D.Yu., Zagryadskij, V.A., Neutron leakage spectra from be, Al, Fe, Ni, Pb, LiPb, Bi, U and Th spheres with T(d,n) and ^{252}Cf neutron sources, Proceedings of the 17th Symposium on Fusion Technology, Rome, Italy, 14-18 September, 1992, pp.1489-1493.
- 7) Smith, J.R., King, J.J., Davidson, J.W., Battat, M.E., Multiplication of 14-MeV neutrons in bulk beryllium, Fusion Technol., vol.23, 1993, pp.51-67.
- 8) von Möllendorff, U., Alevra, A.V., Giese, H., Kappler, F., Klein, H., Tayama, R., Measurements of 14 MeV neutron multiplication in spherical beryllium shells, Fusion Eng. Des., vol.28, 1995, pp.737-744.
- 9) Nie, Y., Ren, J., Ruan, X., Bao, J., Han, R., Zhang, S., Huang, H., Li, X., Ding, Y., Wu, H., Liu, P., Zhou, Z., The benchmark experiment on slab beryllium with D-T neutrons

- for validation of evaluated nuclear data, Fusion Engineering and Design vol.105, 2016, pp.8-14.
- 10) Werner, C.J. (Ed.), MCNP® USER'S MANUAL Code Version 6.2, LA-UR-17-29981, 2017.
 - 11) Konno, C., Ohta, M., Kwon, S., Ohnishi, S., Yamano, N., Sato, S., JENDL-5 benchmark test for shielding applications, Journal of Nuclear Science and Technology, vol.60, no.9, 2023, pp.1046-1069.
 - 12) Konno, C., Ochiai, K., Takakura, K., Ohnishi, S., Kondo, K., Wada, M., Sato, S., Detail analysis of fusion neutronics benchmark experiment on beryllium, Fusion Engineering and Design, vol.85, 2010, pp.2054-2058.
 - 13) DiJulio, D.D., Lee, Y.L., Muhrer, G., Impact of crystallite size on the performance of a beryllium reflector, Journal of Neutron Research, vol.22, 2020, pp.275-279.
 - 14) DiJulio, D.D., Marquez Damian, J.I., Bernasconi, M., Campi, D., Gorini, G., Kittelmann, T., Klinkby, E., Muhrer, G., Ramic, K., Rizzi, N., Santoro, V., Thermal scattering libraries for cold and very-cold neutron reflector materials, EPJ Web of Conferences, vol.284, 2023, 17013.
 - 15) ASTM INTERNATIONAL, Standard Test Methods for Determining Average Grain Size, ASTM E112-13 : 2021.
 - 16) Iwamoto, O., Iwamoto, N., Kunieda, S., et al. Japanese Evaluated Nuclear Data Library version 5 : JENDL-5, Journal of Nuclear Science and Technology, vol.60, no.1, 2023, pp.1-60.

付録 FNS ベリリウム積分実験解析のための MCNP 入力例

>>> Analysis of Beryllium Slab Expt <<<

c

c ***** front air region *****

1 2 4.921-5 +1 -2 -27 \$ -1.00 - 20.00 cm

c ***** Beryllium region *****

2	1	1.22629-1	+2	-3	-26	\$ 20.00 - 21.40 cm
3	1	1.22629-1	+2	-3	+26 -27	\$ 20.00 - 21.40 cm
4	1	1.22629-1	+3	-4	-26	\$ 21.40 - 24.12 cm
5	1	1.22629-1	+3	-4	+26 -27	\$ 21.40 - 24.12 cm
6	1	1.22629-1	+4	-5	-26	\$ 24.12 - 25.17 cm
7	1	1.22629-1	+4	-5	+26 -27	\$ 24.12 - 25.17 cm
8	1	1.22629-1	+5	-6	-26	\$ 25.17 - 26.60 cm
9	1	1.22629-1	+5	-6	+26 -27	\$ 25.17 - 26.60 cm
10	1	1.22629-1	+6	-7	-26	\$ 26.60 - 29.20 cm
11	1	1.22629-1	+6	-7	+26 -27	\$ 26.60 - 29.20 cm
12	1	1.22629-1	+7	-8	-26	\$ 29.20 - 30.23 cm
13	1	1.22629-1	+7	-8	+26 -27	\$ 29.20 - 30.23 cm
14	1	1.22629-1	+8	-9	-26	\$ 30.23 - 31.70 cm
15	1	1.22629-1	+8	-9	+26 -27	\$ 30.23 - 31.70 cm
16	1	1.22629-1	+9	-10	-26	\$ 31.70 - 32.70 cm
17	1	1.22629-1	+9	-10	+26 -27	\$ 31.70 - 32.70 cm
18	1	1.22629-1	+10	-11	-26	\$ 32.70 - 34.28 cm
19	1	1.22629-1	+10	-11	+26 -27	\$ 32.70 - 34.28 cm
20	1	1.22629-1	+11	-12	-26	\$ 34.28 - 34.92 cm
21	1	1.22629-1	+11	-12	+26 -27	\$ 34.28 - 34.92 cm
22	1	1.22629-1	+12	-13	-26	\$ 34.92 - 40.35 cm
23	1	1.22629-1	+12	-13	+26 -27	\$ 34.92 - 40.35 cm
24	1	1.22629-1	+13	-14	-26	\$ 40.35 - 41.80 cm
25	1	1.22629-1	+13	-14	+26 -27	\$ 40.35 - 41.80 cm
26	1	1.22629-1	+14	-15	-26	\$ 41.80 - 45.06 cm
27	1	1.22629-1	+14	-15	+26 -27	\$ 41.80 - 45.06 cm
28	1	1.22629-1	+15	-16	-26	\$ 45.06 - 46.98 cm
29	1	1.22629-1	+15	-16	+26 -27	\$ 45.06 - 46.98 cm
30	1	1.22629-1	+16	-17	-26	\$ 46.98 - 47.90 cm
31	1	1.22629-1	+16	-17	+26 -27	\$ 46.98 - 47.90 cm
32	1	1.22629-1	+17	-18	-26	\$ 47.90 - 50.47 cm

33	1 1.22629-1	+17 -18 +26 -27	\$ 47.90 - 50.47 cm
34	1 1.22629-1	+18 -19 -26	\$ 50.47 - 52.00 cm
35	1 1.22629-1	+18 -19 +26 -27	\$ 50.47 - 52.00 cm
36	1 1.22629-1	+19 -20 -26	\$ 52.00 - 55.20 cm
37	1 1.22629-1	+19 -20 +26 -27	\$ 52.00 - 55.20 cm
38	1 1.22629-1	+20 -21 -26	\$ 55.20 - 57.14 cm
39	1 1.22629-1	+20 -21 +26 -27	\$ 55.20 - 57.14 cm
40	1 1.22629-1	+21 -22 -26	\$ 57.14 - 60.59 cm
41	1 1.22629-1	+21 -22 +26 -27	\$ 57.14 - 60.59 cm
42	1 1.22629-1	+22 -23 -26	\$ 60.59 - 62.10 cm
43	1 1.22629-1	+22 -23 +26 -27	\$ 60.59 - 62.10 cm
44	1 1.22629-1	+23 -24 -26	\$ 62.10 - 63.12 cm
45	1 1.22629-1	+23 -24 +26 -27	\$ 62.10 - 63.12 cm
46	1 1.22629-1	+24 -25 -26	\$ 63.12 - 65.54 cm
47	1 1.22629-1	+24 -25 +26 -27	\$ 63.12 - 65.54 cm

c ***** external void *****

48 0 -1 : +25 : +27 \$

1	pz	-1.00	\$ Source
2	pz	20.00	\$ TPR & react rate
3	pz	21.40	\$ n-spec
4	pz	24.12	\$ fission
5	pz	25.00	\$ TPR & react rate
6	pz	26.60	\$ fission & n-spec
7	pz	29.20	\$ fission
8	pz	30.23	\$ TPR
9	pz	31.70	\$ fission & n-spec
10	pz	32.70	\$ TPR & n-spec
11	pz	34.28	\$ fission
12	pz	34.92	\$ react rate
13	pz	40.35	\$ TPR
14	pz	41.80	\$ fission & n-spec
15	pz	45.06	\$ react rate
16	pz	46.98	\$ fission
17	pz	47.90	\$ TPR & n-spec
18	pz	50.47	\$ TPR
19	pz	52.00	\$ fission & n-spec
20	pz	55.20	\$ react rate

21	pz	57.14	\$	fission
22	pz	60.59	\$	TPR
23	pz	62.10	\$	fission & n-spec
24	pz	63.12	\$	TPR
25	pz	65.54	\$	react rate

c

26	cz	3.00		
27	cz	31.50		

```

imp:n 1  1  1  1  1  1  1  1  1  1  1  1
      1  1  1  1  1  1  1  1  1  1  1  2
      2  2  2  2  2  2  2  2  2  2  2  2
      2  2  2  2  2  4  4  4  4  4  4  0

```

c *****

c * source specification cards *

c *****

sdef erg=d1 pos=0 0 0 vec=0 0 1 dir=d2 wgt=1.1261

sb2 -31 4.0

si1 1.0010-11 3.2241-07

5.3156-07	8.7640-07	1.4449-06	2.3826-06	3.9278-06
6.4758-06	1.0677-05	1.7603-05	2.9023-05	4.7850-05
7.8891-05	1.3007-04	2.1455-04	3.5357-04	5.8293-04
9.6110-04	1.2341-03	1.5846-03	2.0346-03	2.6125-03
3.3546-03	4.3073-03	5.5307-03	7.1016-03	9.1186-03
1.1709-02	1.5034-02	1.9304-02	2.1874-02	2.4787-02
2.8087-02	3.1827-02	3.6065-02	4.0867-02	4.6308-02
5.2474-02	5.9461-02	6.7378-02	7.6349-02	8.6515-02
9.8035-02	1.1109-01	1.2588-01	1.4264-01	1.6163-01
1.8315-01	2.0754-01	2.3517-01	2.6649-01	3.0197-01
3.4217-01	3.8774-01	4.3936-01	4.9786-01	5.6415-01
6.3927-01	7.2438-01	8.2084-01	9.3013-01	1.0540+00
1.1943+00	1.3533+00	1.5335+00	1.7377+00	1.8498+00
1.9691+00	2.0961+00	2.2313+00	2.3752+00	2.5284+00
2.6914+00	2.8650+00	3.0498+00	3.2465+00	3.4559+00
3.6787+00	3.9160+00	4.1686+00	4.4374+00	4.7236+00
5.0282+00	5.3525+00	5.6978+00	6.0652+00	6.4564+00
6.8728+00	7.3161+00	7.7879+00	8.2902+00	8.8249+00
9.3940+00	9.9999+00	1.0157+01	1.0317+01	1.0480+01

	1.0645+01	1.0812+01	1.0983+01	1.1156+01	1.1331+01
	1.1510+01	1.1691+01	1.1875+01	1.2062+01	1.2252+01
	1.2445+01	1.2641+01	1.2840+01	1.3042+01	1.3248+01
	1.3456+01	1.3668+01	1.3883+01	1.4102+01	1.4324+01
	1.4550+01	1.4779+01	1.5012+01	1.5248+01	1.5488+01
sp1	0.0	1.5142-07			
	2.2732-09	4.2225-09	7.4848-09	1.4264-08	8.3975-08
	1.8398-07	2.2450-07	1.3922-07	1.6817-07	2.9754-07
	3.8068-06	3.0541-06	2.2612-06	6.9372-06	7.2049-06
	8.7622-06	7.8013-06	1.4320-05	1.1820-05	1.6544-05
	1.4791-05	1.7624-05	2.8404-05	2.4899-05	3.7633-05
	4.4237-05	4.6320-05	6.1572-05	3.7185-05	5.3362-05
	4.4831-05	5.0292-05	5.7202-05	6.9230-05	8.0602-05
	8.3190-05	9.7450-05	1.0531-04	1.2632-04	1.4874-04
	1.7906-04	3.7225-04	4.9933-04	5.3824-04	6.0762-04
	7.0593-04	8.0965-04	9.5392-04	1.0785-03	1.2232-03
	1.3867-03	1.5803-03	1.6473-03	1.8238-03	2.0605-03
	2.2042-03	2.3040-03	2.5211-03	2.5709-03	2.5872-03
	2.5765-03	2.7699-03	2.8528-03	2.5945-03	1.3898-03
	1.4298-03	1.3270-03	1.3489-03	1.3820-03	1.4312-03
	1.3760-03	1.4329-03	1.4558-03	1.3518-03	1.4053-03
	1.2861-03	1.2741-03	1.1711-03	1.1937-03	1.0563-03
	1.0018-03	8.8451-04	7.9827-04	7.9293-04	7.5872-04
	6.9228-04	6.2956-04	5.1710-04	5.0750-04	5.1007-04
	4.1280-04	3.5649-04	9.0768-05	8.2287-05	9.2862-05
	9.1407-05	9.3708-05	7.9567-05	8.8737-05	8.7841-05
	1.1227-04	1.6798-04	1.5985-04	1.6563-04	2.1025-04
	4.1363-04	7.4899-04	7.8183-04	5.1771-04	4.5938-04
	4.6458-04	9.1020-04	2.6083-03	9.5007-04	5.1474-03
	3.0897-02	2.3565-01	4.0901-01	2.2296-01	1.4419-01
c	*****				
c	* material specification cards *				
c	*****				
c	--- Beryllium				
m1	4009.20c	1.22e-1			\$ Be
	6012.20c	7.71e-5			\$ C
	8016.20c	4.98e-4			\$ O
	13027.20c	2.90e-5			\$ Al

```

26054.20c  1.43260E-06          $ Fe-54
26056.20c  2.26548E-05          $ Fe-56
26057.20c  5.43400E-07          $ Fe-57
26058.20c  6.91600E-08          $ Fe-58
3006.20c   2.87e-7             $ Li-6
mt1  Be-001.00t                $ 300K
c    --- air
m2   7014.20c  3.8810-5      8016.20c  1.0400-5
c    --- materials for reaction rate
m3   3006.39y  1.0  $  Li-6(n,t)He-4
m4   13027.39y 1.0  $  Al-27(n,alpha)
m5   22000.39y 1.0  $  Ti-47(n,x)Sc-47
m6   26056.39y 1.0  $  Fe-56(n,p)Mn-56
m7   28058.39y 1.0  $  Ni-58(n,2n) &  Ni-58(n,p)
m8   40090.39y 1.0  $  Zr-90(n,2n)
m9   41093.39y 1.0  $  Nb-93(n,2n)Nb-92m
m10  49115.39y 1.0  $  In-115(n,n')In-115m
m11  79197.39y 1.0  $  Au-197(n,gamma)
m12  92235.39y 1.0  $  U-235(n,fission)
c    --- materials for reaction rate
c    *****
c    *   tally specification cards           *
c    *****
fc02 ---- neutron energy spectrum  vitamine-j surface r=3cm
f02:n  3  6  9  10  14  17  19  23
fq02   s  m  e  f
fs02   -26
e2

1.0000E-11  5.0000E-10  2.0000E-09  5.0000E-09  1.0000E-08
1.4500E-08  2.1000E-08  3.0000E-08  4.0000E-08  5.0000E-08
7.0000E-08  1.0000E-07  1.2500E-07  1.5000E-07  1.8400E-07
2.2500E-07  2.7500E-07  3.2500E-07  3.6680E-07  4.1399E-07
5.0000E-07  5.3158E-07  6.2506E-07  6.8256E-07  8.0000E-07
8.7643E-07  1.0000E-06  1.0400E-06  1.0800E-06  1.1253E-06
1.3000E-06  1.4450E-06  1.8554E-06  2.3824E-06  3.0590E-06
3.9279E-06  5.0435E-06  6.4760E-06  8.3153E-06  1.0677E-05
1.3710E-05  1.7604E-05  2.2603E-05  2.9023E-05  3.7266E-05
4.7851E-05  6.1442E-05  7.8893E-05  1.0130E-04  1.3007E-04

```

1.6702E-04	2.1445E-04	2.7536E-04	3.5357E-04	4.5400E-04
5.8295E-04	7.4852E-04	9.6112E-04	1.2341E-03	1.5846E-03
2.0347E-03	2.2487E-03	2.4852E-03	2.6126E-03	2.7465E-03
3.0354E-03	3.3546E-03	3.7074E-03	4.3074E-03	5.5308E-03
7.1017E-03	9.1188E-03	1.0595E-02	1.1709E-02	1.5034E-02
1.9305E-02	2.1875E-02	2.3579E-02	2.4176E-02	2.4788E-02
2.6058E-02	2.7000E-02	2.8501E-02	3.1828E-02	3.4307E-02
4.0868E-02	4.6309E-02	5.2475E-02	5.6562E-02	6.7379E-02
7.1998E-02	7.9499E-02	8.2503E-02	8.6517E-02	9.8037E-02
1.1109E-01	1.1679E-01	1.2277E-01	1.2907E-01	1.3569E-01
1.4264E-01	1.4996E-01	1.5764E-01	1.6573E-01	1.7422E-01
1.8316E-01	1.9255E-01	2.0242E-01	2.1280E-01	2.2371E-01
2.3518E-01	2.4724E-01	2.7324E-01	2.8725E-01	2.9452E-01
2.9721E-01	2.9849E-01	3.0197E-01	3.3373E-01	3.6883E-01
3.8774E-01	4.0762E-01	4.5049E-01	4.9787E-01	5.2340E-01
5.5023E-01	5.7844E-01	6.0810E-01	6.3928E-01	6.7206E-01
7.0651E-01	7.4274E-01	7.8082E-01	8.2085E-01	8.6294E-01
9.0718E-01	9.6164E-01	1.0026E+00	1.1080E+00	1.1648E+00
1.2246E+00	1.2874E+00	1.3534E+00	1.4227E+00	1.4957E+00
1.5724E+00	1.6530E+00	1.7377E+00	1.8268E+00	1.9205E+00
2.0190E+00	2.1225E+00	2.2313E+00	2.3069E+00	2.3457E+00
2.3653E+00	2.3852E+00	2.4660E+00	2.5924E+00	2.7253E+00
2.8651E+00	3.0119E+00	3.1664E+00	3.3287E+00	3.6788E+00
4.0657E+00	4.4933E+00	4.7237E+00	4.9659E+00	5.2205E+00
5.4881E+00	5.7695E+00	6.0653E+00	6.3763E+00	6.5924E+00
6.7032E+00	7.0469E+00	7.4082E+00	7.7880E+00	8.1873E+00
8.6071E+00	9.0484E+00	9.5123E+00	1.0000E+01	1.0513E+01
1.1052E+01	1.1618E+01	1.2214E+01	1.2523E+01	1.2840E+01
1.3499E+01	1.3840E+01	1.4191E+01	1.4550E+01	1.4918E+01
1.5683E+01	1.6487E+01	1.6905E+01	1.7332E+01	1.9640E+01

fc12 ---- Tritium production rate(TPR) Li-6(n,t) surface r=3cm

f12:n 2 5 8 10 13 17 18 22 24

fs12 -26

fq12 s e f m

fm12 (1) (1 3 105)

fc22 ---- fission rate (U-235) surface r=3cm

f22:n 4 6 7 9 11 14 16 19 21 23

fs22 -26

fq22 s e f m

fm22 (1) (1 12 18)

fc32 ---- reaction rate (Al27,Ti47,48,Fe56,Ni58,Zr90,Nb93,In115,Au197) surface

f32:n 2 5 12 15 20 25

fs32 -26

fq32 s e f m

fm32 (1) (1 4 107) (1 5 221) (1 5 222) (1 6 103)

(1 7 16) (1 7 103) (1 8 16) (1 9 16) (1 10 51)

(1 11 102)

c

fc92 ---- neutron energy 175-g spectrum surface r=3cm

f92:n 3 6 9 10 14 17 19 23

fq92 s m e f

fs92 -26

e92 1.00001e-11 1.00001e-7 4.13994e-7 5.31578e-7 6.82560e-7 8.76425e-7
 1.12535e-6 1.44498e-6 1.85539e-6 2.38237e-6 3.05902e-6 3.92786e-6
 5.04348e-6 6.47595e-6 8.31529e-6 1.06770e-5 1.37096e-5 1.76035e-5
 2.26033e-5 2.90232e-5 3.72665e-5 4.78512e-5 6.14421e-5 7.88932e-5
 1.01301e-4 1.30073e-4 1.67017e-4 2.14454e-4 2.75364e-4 3.53575e-4
 4.53999e-4 5.82947e-4 7.48518e-4 9.61116e-4 1.23410e-3 1.58461e-3
 2.03468e-3 2.24867e-3 2.48517e-3 2.61259e-3 2.74654e-3 3.03539e-3
 3.35463e-3 3.70744e-3 4.30742e-3 5.53084e-3 7.10174e-3 9.11882e-3
 1.05946e-2 1.17088e-2 1.50344e-2 1.93045e-2 2.18749e-2 2.35786e-2
 2.41755e-2 2.47875e-2 2.60584e-2 2.70001e-2 2.85011e-2 3.18278e-2
 3.43067e-2 4.08677e-2 4.63092e-2 5.24752e-2 5.65622e-2 6.73794e-2
 7.19981e-2 7.94987e-2 8.25034e-2 8.65169e-2 9.80366e-2 1.11090e-1
 1.16786e-1 1.22773e-1 1.29068e-1 1.35686e-1 1.42642e-1 1.49956e-1
 1.57644e-1 1.65727e-1 1.74224e-1 1.83156e-1 1.92547e-1 2.02419e-1
 2.12797e-1 2.23708e-1 2.35177e-1 2.47235e-1 2.73237e-1 2.87247e-1
 2.94518e-1 2.97211e-1 2.98491e-1 3.01974e-1 3.33733e-1 3.68832e-1
 3.87742e-1 4.07622e-1 4.50492e-1 4.97871e-1 5.23397e-1 5.50232e-1
 5.78444e-1 6.08101e-1 6.39279e-1 6.72055e-1 7.06512e-1 7.42736e-1
 7.80817e-1 8.20850e-1 8.62936e-1 9.07180e-1 9.61640e-1 1.00259e+0
 1.10803e+0 1.16484e+0 1.22456e+0 1.28735e+0 1.35335e+0 1.42274e+0
 1.49569e+0 1.57237e+0 1.65299e+0 1.73774e+0 1.82684e+0 1.92050e+0
 2.01897e+0 2.12248e+0 2.23130e+0 2.30686e+0 2.34570e+0 2.36525e+0
 2.38521e+0 2.46597e+0 2.59240e+0 2.72532e+0 2.86505e+0 3.01194e+0
 3.16637e+0 3.32871e+0 3.67879e+0 4.06570e+0 4.49329e+0 4.72367e+0

```

4.96585e+0 5.22046e+0 5.48812e+0 5.76950e+0 6.06531e+0 6.37628e+0
6.59238e+0 6.70320e+0 7.04688e+0 7.40818e+0 7.78801e+0 8.18731e+0
8.60708e+0 9.04837e+0 9.51229e+0 1.00000e+1 1.05127e+1 1.10517e+1
1.16183E+1 1.22140E+1 1.25232E+1 1.28400E+1 1.34986E+1 1.38403E+1
1.41907E+1 1.45499E+1 1.49183E+1 1.56831E+1 1.64872E+1 1.69046E+1
1.73325E+1 1.96403E+1
c -----
c *****
c * problem cutoff cards *
c *****
phys:n 20.0 0.0
mode n
cut:n 0 1.0e-10 -0.5 -0.25 0
nps 20000000
c ctme 3000
c *****
c * peripheral cards *
c *****
prdmp 2000000 200000 1 3
lost 10 10
print

```