

中性子輸送方程式とその解

中性子拡散方程式の導出の振り返り

フィックの法則により、中性子流 \vec{j} と中性子束 ϕ を以下のように関係付ける(これは近似的扱いである)。

$$\vec{j}(\vec{r}) = -D\nabla\phi(\vec{r})$$

$$\nabla \cdot \vec{j}(\vec{r}) + \Sigma_a\phi(\vec{r}) = \nu\Sigma_f\phi(\vec{r})$$



$$-D\nabla^2\phi(\vec{r}) + \Sigma_a\phi(\vec{r}) = \nu\Sigma_f\phi(\vec{r})$$

中性子拡散方程式

中性子拡散方程式の導出の振り返り

フィックの法則により、中性子流 \vec{j} と中性子束 ϕ を以下のように関係付ける(これは近似的扱いである)。

$$\vec{j}(\vec{r}) \approx -D\nabla\phi(\vec{r})$$

$$\nabla \cdot \vec{j}(\vec{r}) + \Sigma_a\phi(\vec{r}) = \nu\Sigma_f\phi(\vec{r})$$



$$-D\nabla^2\phi(\vec{r}) + \Sigma_a\phi(\vec{r}) = \nu\Sigma_f\phi(\vec{r})$$

中性子拡散方程式

中性子輸送方程式の導入

以下の中性子バランスの式に立ち戻る。

$$\nabla \cdot \vec{J}(\vec{r}) + \Sigma_a \phi(\vec{r}) = \nu \Sigma_f \phi(\vec{r})$$

上の中性子バランスの式に現れる中性子流 \vec{J} 、中性子束 ϕ は、角度中性子束 $\psi(\vec{\Omega})$ を用いて以下で定義される物理量である。

$$\vec{J} = \int \vec{\Omega} \psi(\vec{\Omega}) d\vec{\Omega}$$

$$\phi = \int \psi(\vec{\Omega}) d\vec{\Omega}$$

中性子輸送方程式の導入

$\vec{J} = \int \vec{\Omega} \psi(\vec{\Omega}) d\vec{\Omega}$ 、 $\phi = \int \psi(\vec{\Omega}) d\vec{\Omega}$ を中性子バランスの式

$$\nabla \cdot \vec{J}(\vec{r}) + \Sigma_a \phi(\vec{r}) = \nu \Sigma_f \phi(\vec{r})$$

に代入すると以下が得られる。

$$\nabla \cdot \int \vec{\Omega} \psi(\vec{r}, \vec{\Omega}) d\vec{\Omega} + \Sigma_a \int \psi(\vec{r}, \vec{\Omega}) d\vec{\Omega} = \nu \Sigma_f \int \psi(\vec{r}, \vec{\Omega}) d\vec{\Omega}$$

これは以下のように変形できる。

$$\int \vec{\Omega} \cdot \nabla \psi(\vec{r}, \vec{\Omega}) d\vec{\Omega} + \int \Sigma_a \psi(\vec{r}, \vec{\Omega}) d\vec{\Omega} = \int \frac{1}{4\pi} d\vec{\Omega} \int \nu \Sigma_f \psi(\vec{r}, \vec{\Omega}') d\vec{\Omega}'$$

中性子輸送方程式の導入

$$\int \vec{\Omega} \cdot \nabla \psi(\vec{r}, \vec{\Omega}) d\vec{\Omega} + \int \Sigma_a \psi(\vec{r}, \vec{\Omega}) d\vec{\Omega} = \int \frac{1}{4\pi} d\vec{\Omega} \int v \Sigma_f \psi(\vec{r}, \vec{\Omega}') d\vec{\Omega}'$$

これを整理すると以下が得られる。

$$\int \left[\vec{\Omega} \cdot \nabla \psi(\vec{r}, \vec{\Omega}) + \Sigma_a \psi(\vec{r}, \vec{\Omega}) - \frac{1}{4\pi} \int v \Sigma_f \psi(\vec{r}, \vec{\Omega}') d\vec{\Omega}' \right] d\vec{\Omega} = 0$$

従って、以下が得られる。

$$\vec{\Omega} \cdot \nabla \psi(\vec{r}, \vec{\Omega}) + \Sigma_a \psi(\vec{r}, \vec{\Omega}) = \frac{1}{4\pi} \int v \Sigma_f \psi(\vec{r}, \vec{\Omega}') d\vec{\Omega}'$$

この式が中性子輸送方程式である。この式が満足されていれば、もともとの中性子のバランス式が満足されることが分かる。

中性子拡散方程式は、中性子輸送方程式の近似式とも理解できる。

中性子輸送方程式の導入

前スライドで示した中性子輸送方程式を再掲する。

$$\vec{\Omega} \cdot \nabla \psi(\vec{r}, \vec{\Omega}) + \Sigma_a \psi(\vec{r}, \vec{\Omega}) = \frac{1}{4\pi} \int \nu \Sigma_f \psi(\vec{r}, \vec{\Omega}') d\vec{\Omega}'$$

中性子拡散方程式においては中性子束の角度依存性という概念が無い(変数が中性子束 $\phi(\vec{r})$ であった)ため、中性子が原子核と散乱反応を起こして運動方向を変えることは無視されていた。

一方、中性子輸送方程式ではこのような現象を考慮することが可能である。

$$\begin{aligned} & \vec{\Omega} \cdot \nabla \psi(\vec{r}, \vec{\Omega}) + \Sigma_a \psi(\vec{r}, \vec{\Omega}) + \int \Sigma_s(\vec{\Omega} \rightarrow \vec{\Omega}') \psi(\vec{r}, \vec{\Omega}) d\vec{\Omega}' \\ & = \int \Sigma_s(\vec{\Omega}' \rightarrow \vec{\Omega}) \psi(\vec{r}, \vec{\Omega}') d\vec{\Omega}' + \frac{1}{4\pi} \int \nu \Sigma_f \psi(\vec{r}, \vec{\Omega}') d\vec{\Omega}' \end{aligned}$$

中性子輸送方程式の導入

$$\begin{aligned} & \vec{\Omega} \cdot \nabla \psi(\vec{r}, \vec{\Omega}) + \Sigma_a \psi(\vec{r}, \vec{\Omega}) + \int \Sigma_s(\vec{\Omega} \rightarrow \vec{\Omega}') \psi(\vec{r}, \vec{\Omega}) d\vec{\Omega}' \\ & = \int \Sigma_s(\vec{\Omega}' \rightarrow \vec{\Omega}) \psi(\vec{r}, \vec{\Omega}') d\vec{\Omega}' + \frac{1}{4\pi} \int \nu \Sigma_f \psi(\vec{r}, \vec{\Omega}') d\vec{\Omega}' \end{aligned}$$

左辺第3項の積分は以下のように書き直せる。

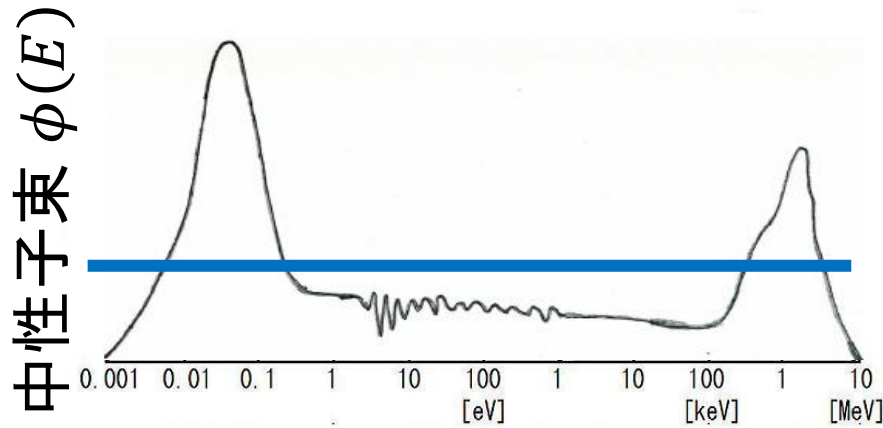
$$\int \Sigma_s(\vec{\Omega} \rightarrow \vec{\Omega}') \psi(\vec{r}, \vec{\Omega}) d\vec{\Omega}' = \psi(\vec{r}, \vec{\Omega}) \int \Sigma_s(\vec{\Omega} \rightarrow \vec{\Omega}') d\vec{\Omega}' = \Sigma_s \psi(\vec{r}, \vec{\Omega})$$

全反応断面積 $\Sigma_t = \Sigma_a + \Sigma_s$ を用いて、中性子輸送方程式は以下のように書き直せる。

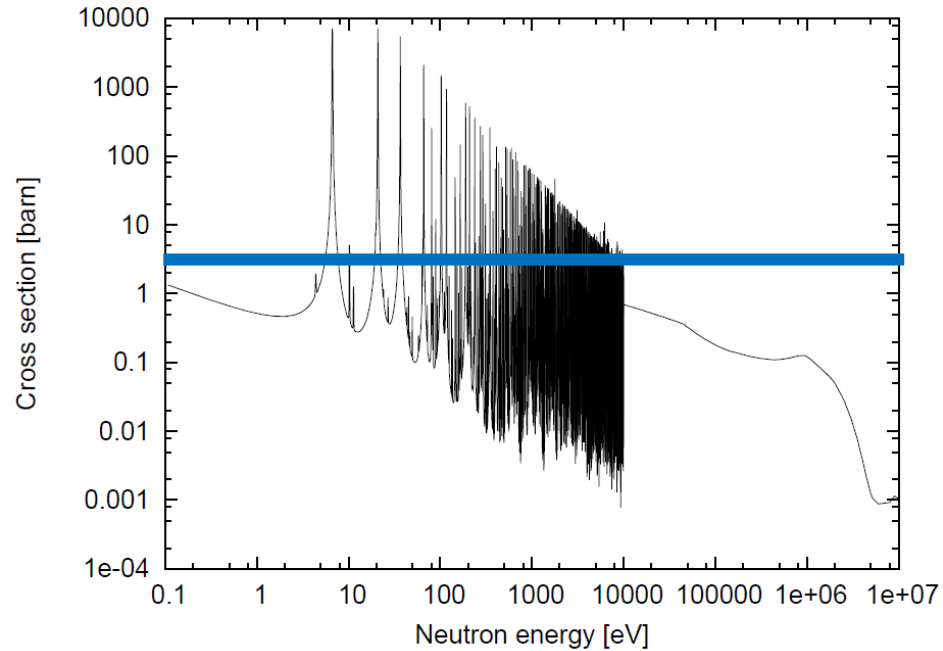
$$\begin{aligned} & \vec{\Omega} \cdot \nabla \psi(\vec{r}, \vec{\Omega}) + \Sigma_t \psi(\vec{r}, \vec{\Omega}) \\ & = \int \Sigma_s(\vec{\Omega}' \rightarrow \vec{\Omega}) \psi(\vec{r}, \vec{\Omega}') d\vec{\Omega}' + \frac{1}{4\pi} \int \nu \Sigma_f \psi(\vec{r}, \vec{\Omega}') d\vec{\Omega}' \end{aligned}$$

エネルギー1群近似

これまでの議論は、中性子束や反応断面積のエネルギー依存性を無視するという近似(エネルギー1群近似)に基づいていました。



中性子運動エネルギー(E)



中性子輸送方程式の導入

これまでに示した中性子輸送方程式は、エネルギー-1群近似のもとでのものであった。

$$\begin{aligned} & \vec{\Omega} \cdot \nabla \psi(\vec{r}, \vec{\Omega}) + \Sigma_t \psi(\vec{r}, \vec{\Omega}) \\ &= \int \Sigma_s(\vec{\Omega}' \rightarrow \vec{\Omega}) \psi(\vec{r}, \vec{\Omega}') d\vec{\Omega}' + \frac{1}{4\pi} \int v \Sigma_f \psi(\vec{r}, \vec{\Omega}') d\vec{\Omega}' \end{aligned}$$

エネルギーに対する依存性を考慮した中性子輸送方程式は以下となる。

$$\begin{aligned} & \vec{\Omega} \cdot \nabla \psi(\vec{r}, E, \vec{\Omega}) + \Sigma_t(E) \psi(\vec{r}, E, \vec{\Omega}) \\ &= \int \int \Sigma_s(E' \rightarrow E, \vec{\Omega}' \rightarrow \vec{\Omega}) \psi(\vec{r}, E', \vec{\Omega}') dE' d\vec{\Omega}' \\ &+ \frac{\chi(E)}{4\pi} \int \int v \Sigma_f(E') \psi(\vec{r}, E', \vec{\Omega}') dE' d\vec{\Omega}' \end{aligned}$$

中性子輸送方程式の導入

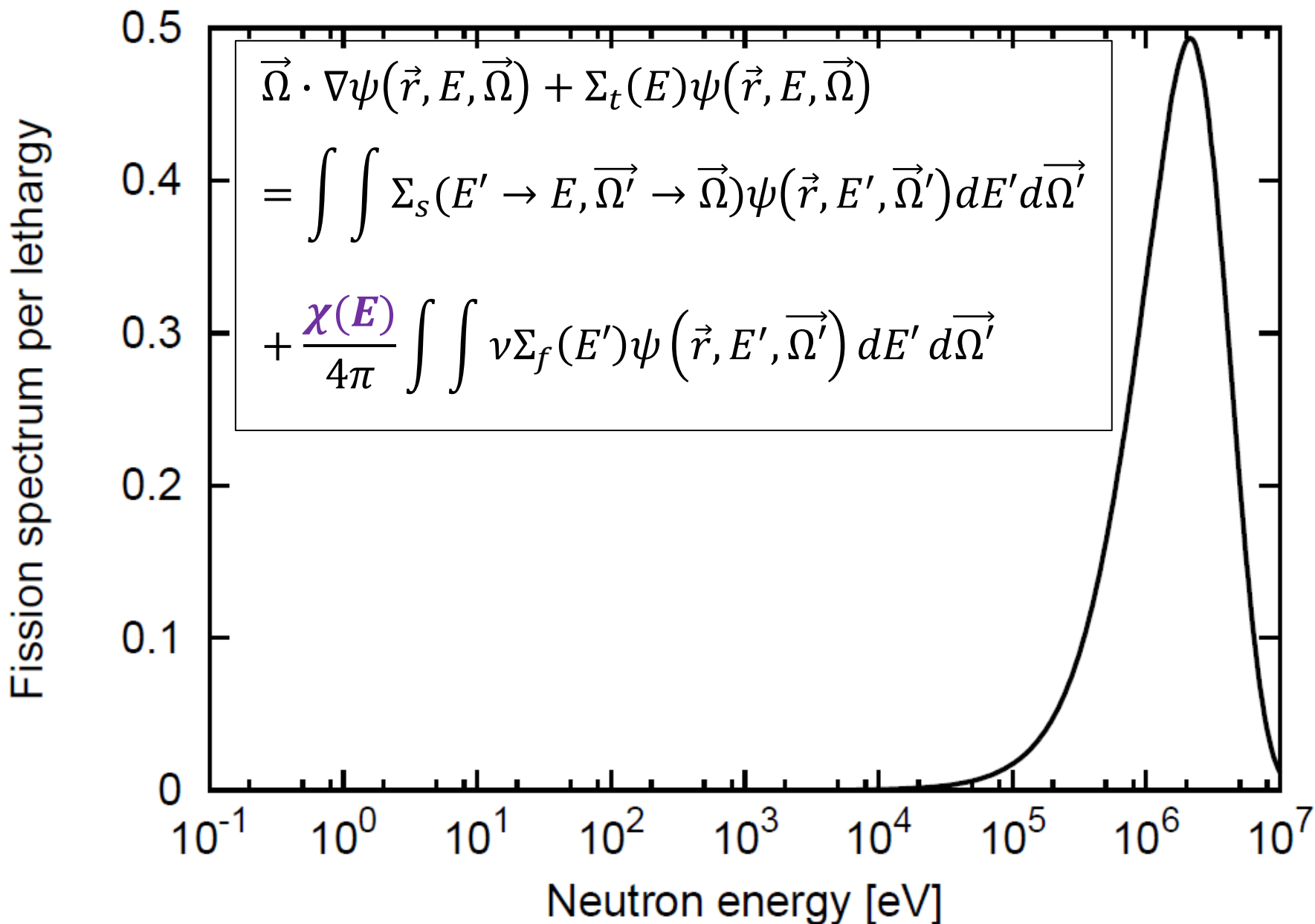
これまでに示した中性子輸送方程式は、エネルギー-1群近似のもとでのものであった。

$$\begin{aligned} & \vec{\Omega} \cdot \nabla \psi(\vec{r}, \vec{\Omega}) + \Sigma_t \psi(\vec{r}, \vec{\Omega}) \\ &= \int \Sigma_s(\vec{\Omega}' \rightarrow \vec{\Omega}) \psi(\vec{r}, \vec{\Omega}') d\vec{\Omega}' + \frac{1}{4\pi} \int \nu \Sigma_f \psi(\vec{r}, \vec{\Omega}') d\vec{\Omega}' \end{aligned}$$

エネルギーに対する依存性を考慮した中性子輸送方程式は以下となる。

$$\begin{aligned} & \vec{\Omega} \cdot \nabla \psi(\vec{r}, E, \vec{\Omega}) + \Sigma_t(E) \psi(\vec{r}, E, \vec{\Omega}) \\ &= \int \int \Sigma_s(E' \rightarrow E, \vec{\Omega}' \rightarrow \vec{\Omega}) \psi(\vec{r}, E', \vec{\Omega}') dE' d\vec{\Omega}' \\ &+ \frac{\chi(E)}{4\pi} \int \int \nu \Sigma_f(E') \psi(\vec{r}, E', \vec{\Omega}') dE' d\vec{\Omega}' \end{aligned}$$

$\chi(E)$: 核分裂反応で発生する中性子のエネルギー分布



中性子輸送方程式の導入

これまでに示した中性子輸送方程式は単一の媒質で構成される体系に対するものであったので、反応断面積に位置依存性は無かった。

体系の空間上の非均質性を考慮した輸送方程式は以下となる。

$$\begin{aligned} & \vec{\Omega} \cdot \nabla \psi(\vec{r}, E, \vec{\Omega}) + \Sigma_t(\vec{r}, E) \psi(\vec{r}, E, \vec{\Omega}) \\ &= \int \int \Sigma_s(\vec{r}, E' \rightarrow E, \vec{\Omega}' \rightarrow \vec{\Omega}) \psi(\vec{r}, E', \vec{\Omega}') d\vec{\Omega}' \\ &+ \frac{\chi(E)}{4\pi} \int \int \nu \Sigma_f(\vec{r}, E') \psi(\vec{r}, E', \vec{\Omega}') dE' d\vec{\Omega}' \end{aligned}$$

中性子輸送方程式の導入

これまでに示した中性子輸送方程式は臨界状態を想定したものであったので、臨界状態以外にも適用可能とするためパラメータ k を導入する。

$$\begin{aligned} & \vec{\Omega} \cdot \nabla \psi(\vec{r}, E, \vec{\Omega}) + \Sigma_t(\vec{r}, E) \psi(\vec{r}, E, \vec{\Omega}) \\ &= \int \int \Sigma_s(\vec{r}, E' \rightarrow E, \vec{\Omega}' \rightarrow \vec{\Omega}) \psi(\vec{r}, E', \vec{\Omega}') d\vec{\Omega}' \\ &+ \frac{\mathbf{1}}{k} \frac{\chi(E)}{4\pi} \int \int v \Sigma_f(\vec{r}, E') \psi(\vec{r}, E', \vec{\Omega}') dE' d\vec{\Omega}' \end{aligned}$$

拡散方程式のときと同様、ここで導入されたパラメータ k が中性子増倍率に対応する。

核分裂増倍系に対して中性子輸送方程式が定義される。
この方程式を解いて中性子増倍率 k を得ることにより、その核分裂増倍系が臨界であるか否かを予測する。

中性子輸送方程式の数値計算手法の分類

確率論的手法:

- ・乱数を用いた中性子輸送・核反応の仮想シミュレーション
- ・利点: 高精度な解が得られる(離散化誤差が無い)
- ・欠点: 統計的不確かさが生じる

決定論的手法:

- ・解く方程式をメッシュで離散化/関数展開
- ・利点: 高速で低コスト(詳細さに依存する)
- ・欠点: 離散化誤差・展開の打ち切り誤差による系統的な不確かさが生じる

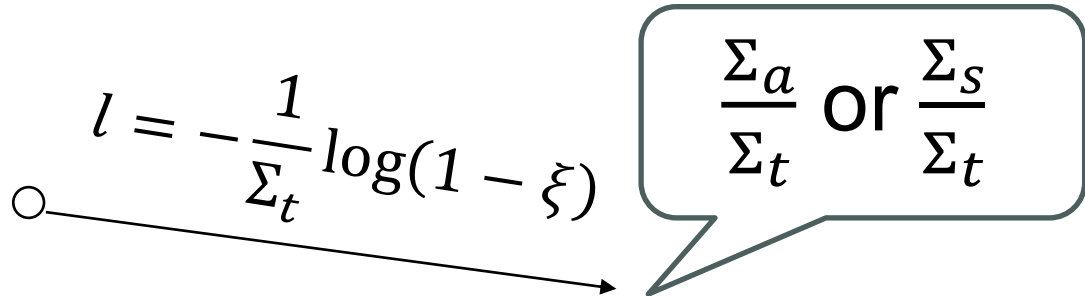
以降では確率論的手法についてごく簡単に説明する。

決定論的手法については、北大OCWの「原子炉炉心解析手法オンラインセミナー」を視聴すると良い。

確率論的手法(モンテカルロ法)の概要

擬似乱数を用いて粒子の挙動をシミュレーション

- ① 核分裂源の空間・エネルギー分布に従って複数の中性子をランダムに発生
- ② それぞれの中性子が原子核と衝突するまでの距離をランダムに決定
- ③ 衝突後に起こす反応の種類をランダムに決定
 - a. 吸収反応: 粒子が消滅 or 重みを減少
 - b. 散乱反応: エネルギー・方向を変化


$$l = -\frac{1}{\Sigma_t} \log(1 - \xi)$$

$$\frac{\Sigma_a}{\Sigma_t} \text{ or } \frac{\Sigma_s}{\Sigma_t}$$

粒子輸送モンテカルロ計算コードの例

コードを支える基盤技術

計算科学
並列化, 高速化

核・原子データ
JENDL, EGS5

核反応モデル
JQMD, JAM, SMM

人体モデル技術
メッシュファントム

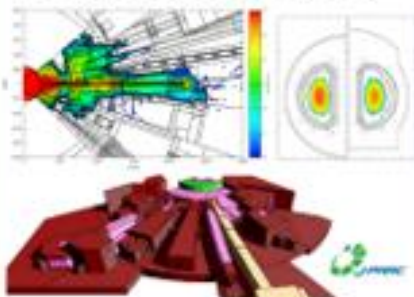
誘導放射能計算
DCHAIN-PHITS

コードの利用分野



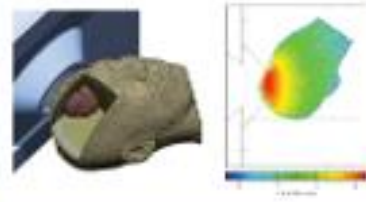
放射線施設設計

- ・加速器 (J-PARC, RIBF)
- ・核融合 (JT-60)
- ・医療用放射線施設



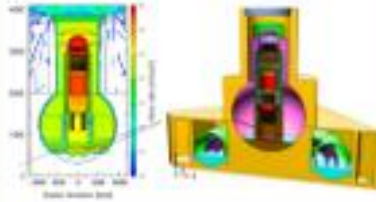
医学物理計算

- ・粒子線治療, BNCT
- ・CT診断線量評価
- ・X線治療、核医学



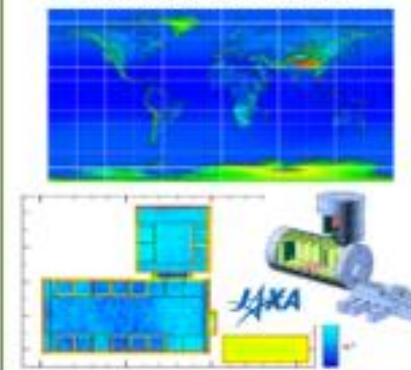
放射線防護研究

- ・線量換算係数
(ICRP116,123,144)
- ・福島原発事故対策



宇宙線・地球科学

- ・空気シャワー
- ・宇宙線被ばく評価



【1】 出典：PHITS開発チーム

数値解法としては厳密でも、入力情報に不確かさがあることに注意

核分裂連鎖体系のためのモンテカルロ計算コードの例としては以下が挙げられる。

- ・ 米国 : MCNP
- ・ 欧州 : Serpent
- ・ 日本 : MVP-3

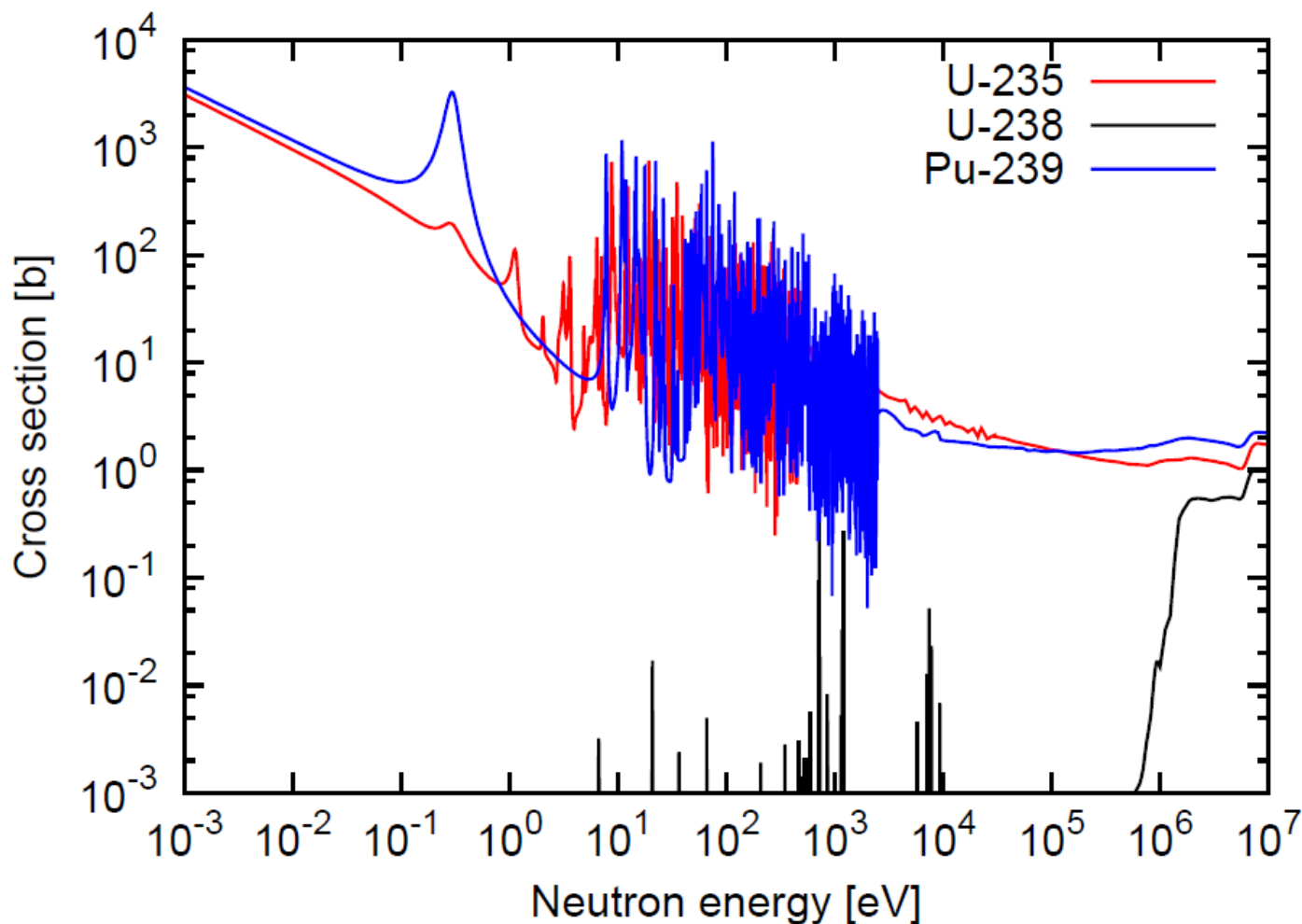
これらにより、中性子実効増倍率 k_{eff} の計算(臨界計算)が可能である。

中性子輸送方程式と核データ

$$\begin{aligned} & \vec{\Omega} \cdot \nabla \psi(\vec{r}, E, \vec{\Omega}) + \Sigma_t(\vec{r}, E) \psi(\vec{r}, E, \vec{\Omega}) \\ &= \int \int \Sigma_s(\vec{r}, E' \rightarrow E, \vec{\Omega}' \rightarrow \vec{\Omega}) \psi(\vec{r}, E', \vec{\Omega}') d\vec{\Omega}' \\ &+ \frac{1}{k} \frac{\chi(E)}{4\pi} \int \int \nu \Sigma_f(\vec{r}, E') \psi(\vec{r}, E', \vec{\Omega}') dE' d\vec{\Omega}' \end{aligned}$$

中性子輸送方程式に現れる Σ_t 、 Σ_s 、 χ 、 ν 、 Σ_f といったパラメータは、中性子と原子核の相互作用に係る物理定数であり、「核データ」と呼ばれる。

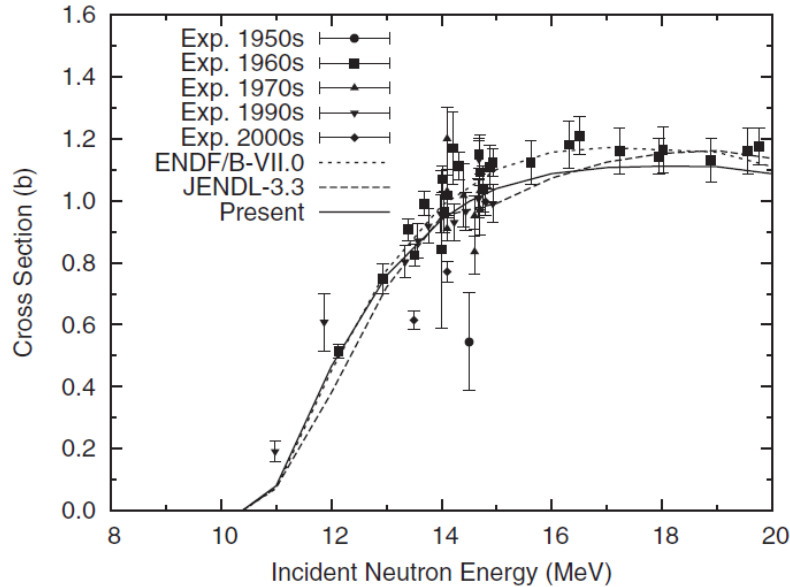
核データの例：核分裂反応断面積



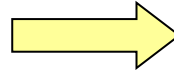
原子核の中性子との反応断面積は、原子核の種類、反応の種類、入射中性子のエネルギーに依存する。真値が存在する物理定数であるが、それを知ることは不可能と言ってよい。

核データの推定(評価)

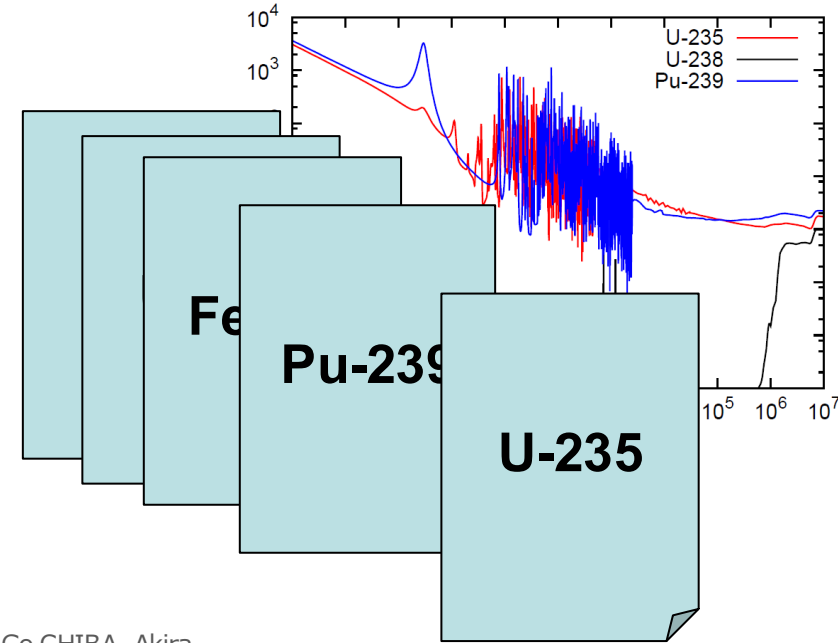
(測定データ、理論模型)



評価



(評価済み核データファイル)



[2] Evaluation of Neutron Nuclear Data on Arsenic-75 for JENDL-4, Keiichi SHIBATA, Go CHIBA, Akira ICHIHARA and Satoshi KUNIEDA, Journal of Nuclear Science and Technology Volume 47 Issue 1, copyright © 2010 Atomic Energy Society of Japan, reprinted by permission of Informa UK Limited, trading as Taylor & Francis Group, www.tandfonline.com on behalf of Atomic Energy Society of Japan.

測定データや原子核物理に関する理論・モデルなどの情報に基づいて、個々の核データについて最も確からしい値を推定する。これを核データの「評価」と呼ぶ。評価された核データは「評価済み核データファイル」として整備・公開されている。

世界の評価済み核データファイル

- ・ **JENDL**: 日本。2026年4月時点での最新版はJENDL-5。
- ・ **ENDF**: 米国。最新版はENDF/B-VIII.1。
- ・ **JEFF**: 欧州。最新版はJEFF-4.0。

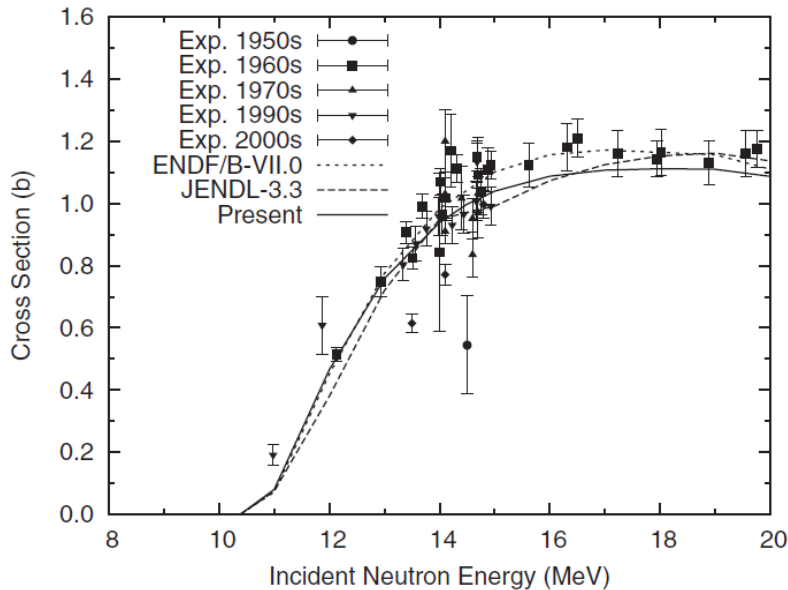
その他、TENDL、BROND(露)、CENDL(中)等がある。

評価済み核データファイル(ENDFフォーマット)の例

		15	104	195	12925	1451	355
		15	107	311	12925	1451	356
					2925	1	099999
					2925	0	0
2.906300+4	6.238900+1	0	0	1	02925	2151	1
2.906300+4	1.000000+0	0	0	1	02925	2151	2
1.000000-5	5.000000+4	1	2	0	02925	2151	3
1.500000+0	6.700000-1	0	0	2	02925	2151	4
6.238900+1	0.000000+0	0	0	810	1352925	2151	5
-1.870000+3	2.000000+0	6.486000+1	6.410000+1	7.600000-1	0.000000+0	2925	2151
-2.710000+2	1.000000+0	5.416670+0	4.916670+0	5.000000-1	0.000000+0	2925	2151
4.020000+2	2.000000+0	5.002832-1	2.832000-4	5.000000-1	0.000000+0	2925	2151
5.790000+2	2.000000+0	1.075000+0	5.900000-1	4.850000-1	0.000000+0	2925	2151
6.500000+2	1.000000+0	3.669333-1	1.693330-2	3.500000-1	0.000000+0	2925	2151
2.038000+3	1.000000+0	4.316660+1	4.266660+1	5.000000-1	0.000000+0	2925	2151
2.642000+3	2.000000+0	5.860000+0	5.280000+0	5.800000-1	0.000000+0	2925	2151
4.402000+3	1.000000+0	5.985330+0	5.333330+0	6.520000-1	0.000000+0	2925	2151
4.865000+3	1.000000+0	1.467000+1	1.400000+1	6.700000-1	0.000000+0	2925	2151
5.400000+3	2.000000+0	3.655990+1	3.599990+1	5.600000-1	0.000000+0	2925	2151
5.831000+3	2.000000+0	9.859990+0	9.359990+0	5.000000-1	0.000000+0	2925	2151
7.094000+3	2.000000+0	8.760000-1	3.760000-1	5.000000-1	0.000000+0	2925	2151
7.570000+3	1.000000+0	1.795830+1	1.733330+1	6.250000-1	0.000000+0	2925	2151
7.950000+3	2.000000+0	7.680490+1	7.599990+1	8.050000-1	0.000000+0	2925	2151
8.367000+3	1.000000+0	6.673330+0	6.053330+0	6.200000-1	0.000000+0	2925	2151
9.207000+3	2.000000+0	4.678000+1	4.640000+1	3.800000-1	0.000000+0	2925	2151
9.774000+3	2.000000+0	4.735000+0	4.352000+0	3.830000-1	0.000000+0	2925	2151
9.940000+3	1.000000+0	1.076570+2	1.066670+2	9.900000-1	0.000000+0	2925	2151
1.084000+4	2.000000+0	5.957900+1	5.920000+1	3.790000-1	0.000000+0	2925	2151
1.252000+4	1.000000+0	1.378330+1	1.333330+1	4.500000-1	0.000000+0	2925	2151

核データを用いた中性子輸送方程式の計算

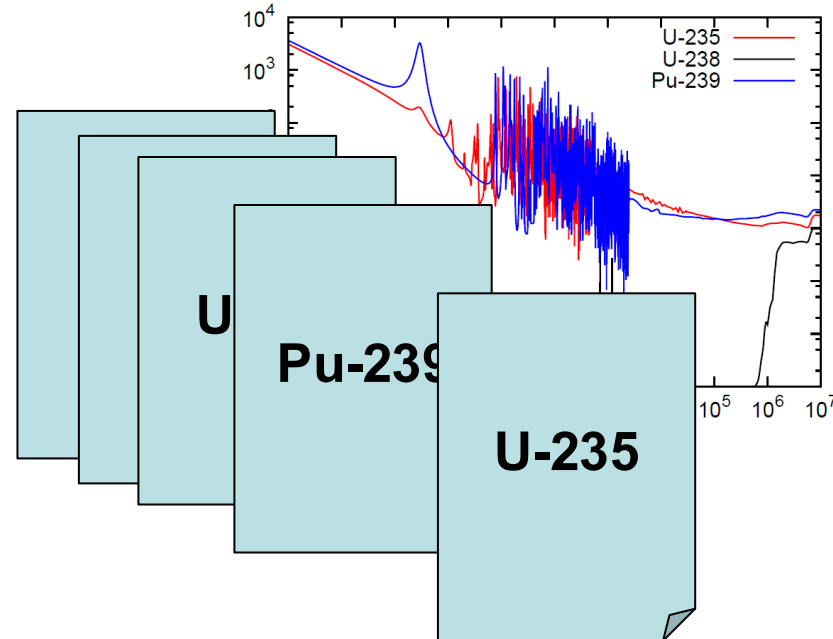
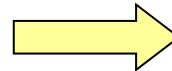
(測定データ、理論模型)



[2] Evaluation of Neutron Nuclear Data on Arsenic-75 for JENDL-4, Keiichi SHIBATA, Go CHIBA, Akira ICHIHARA and Satoshi KUNIEDA, Journal of Nuclear Science and Technology Volume 47 Issue 1, copyright © 2010 Atomic Energy Society of Japan, reprinted by permission of Informa UK Limited, trading as Taylor & Francis Group, www.tandfonline.com on behalf of Atomic Energy Society of Japan.

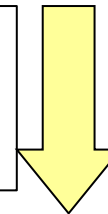
(評価済み核データファイル)

評価



処理

(FRENDY, NJOY, ...)



放射線輸送計算コード
(確率論的手法/決定論的手法)



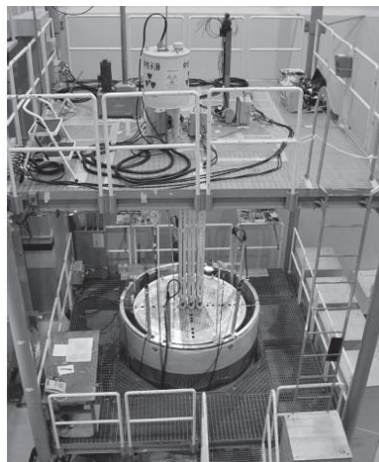
放射線輸送計算コード用
核データライブラリ

中性子輸送方程式の解の予測に対する実験的な検証

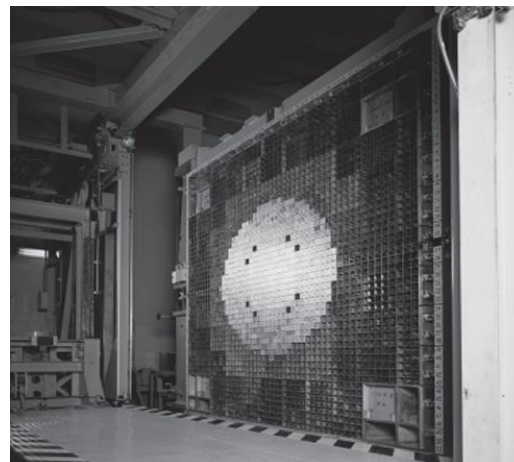
- ・中性子輸送方程式の解を数値的に得ることによって、対象とする核分裂増倍系の核的特性(中性子増倍率や出力の空間分布など)を予測することが出来る。
- ・輸送方程式の数値解には主に、「数値解析に伴う不確かさ」、「核データに由来する不確かさ」が含まれる。
- ・前者はさらに、「モデル化に伴う不確かさ」、「離散化に起因する不確かさ」、「統計的な不確かさ」などに分類される。
- ・輸送方程式の数値解が適切に得られているかを実験的に検証することが極めて有効であり、多くの実験施設で実験データが取得されている。

日本で運用されていた、もしくは運用中の臨界実験装置の例

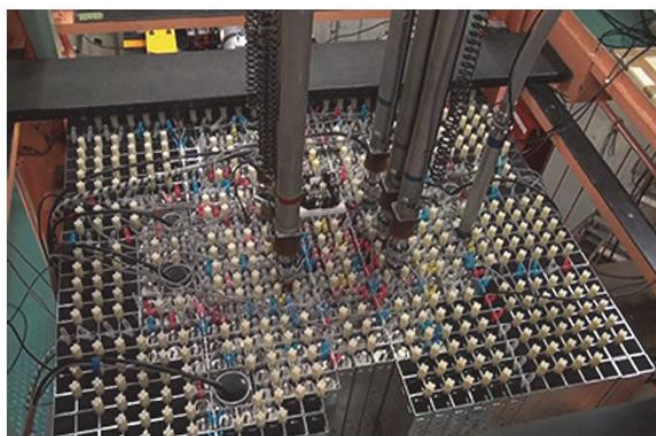
核分裂増倍系の特性に係る実測データを取得するため「臨界実験装置」が一般的に用いられる。



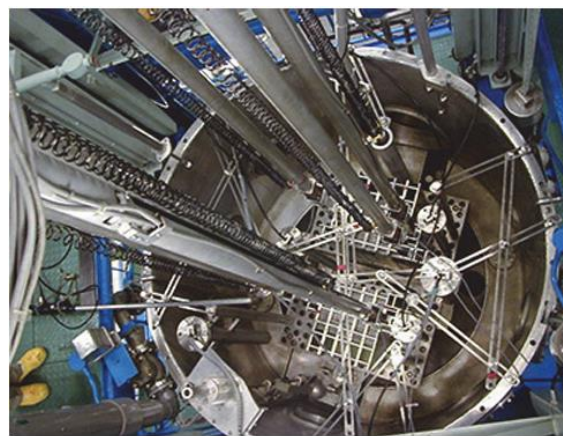
TCA (Thermal Critical Assembly) [3]



FCA (Fast Critical Assembly) [4]



KUCA (Kyoto University Critical Assembly)のA架台 [5]



KUCA のC架台 [6]

【3】 【4】 出典：日本原子力研究所原研史編纂委員会編集，日本原子力研究所史，2005，提供：日本原子力研究開発機構

【5】 【6】 出典：京都大学複合原子力科学研究所ホームページ (<https://www.rri.kyoto-u.ac.jp/facilities/ca>)

定常臨界実験装置STACY (Static experiment critical facility)

この施設では、溶液燃料を取り扱う原子力施設(再処理施設)の臨界安全性を確保するために必要な研究が1995年から2010年に実施された。

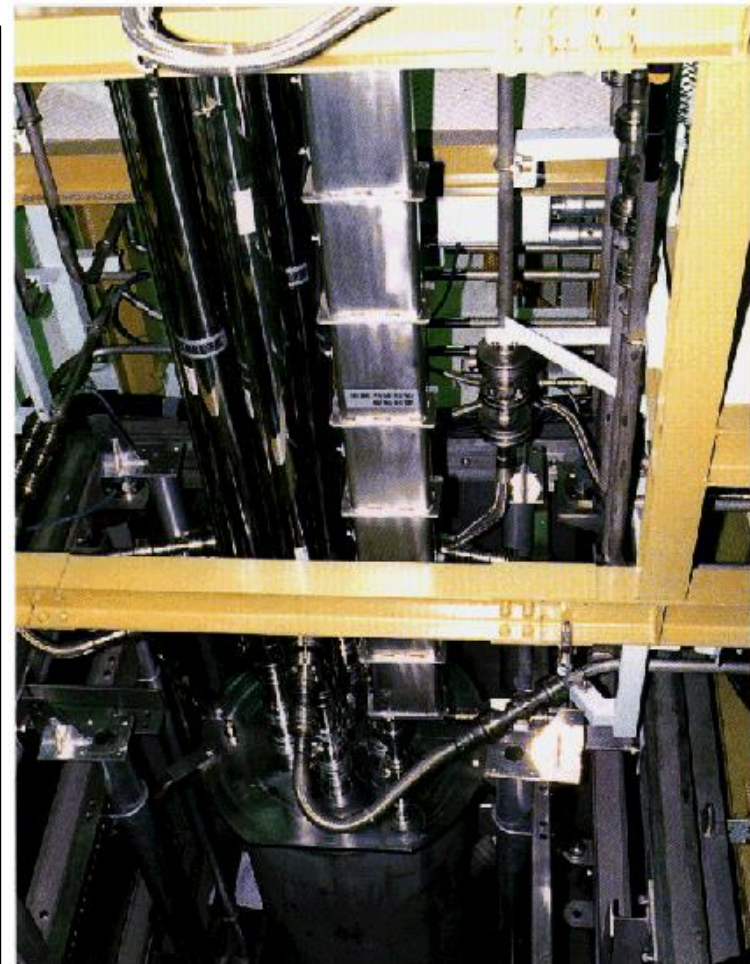
寸法:

- 外径約0.6m、高さ約1.5m
(600Φ円筒型タンク)
- 外径約0.8m、高さ約1.5m
(800Φ円筒型タンク)
- 幅約0.7m、高さ約1.5m
(280T平板型タンク)

燃料: ウラン硝酸溶液、低濃縮ウラン燃料棒

最大熱出力: 200W

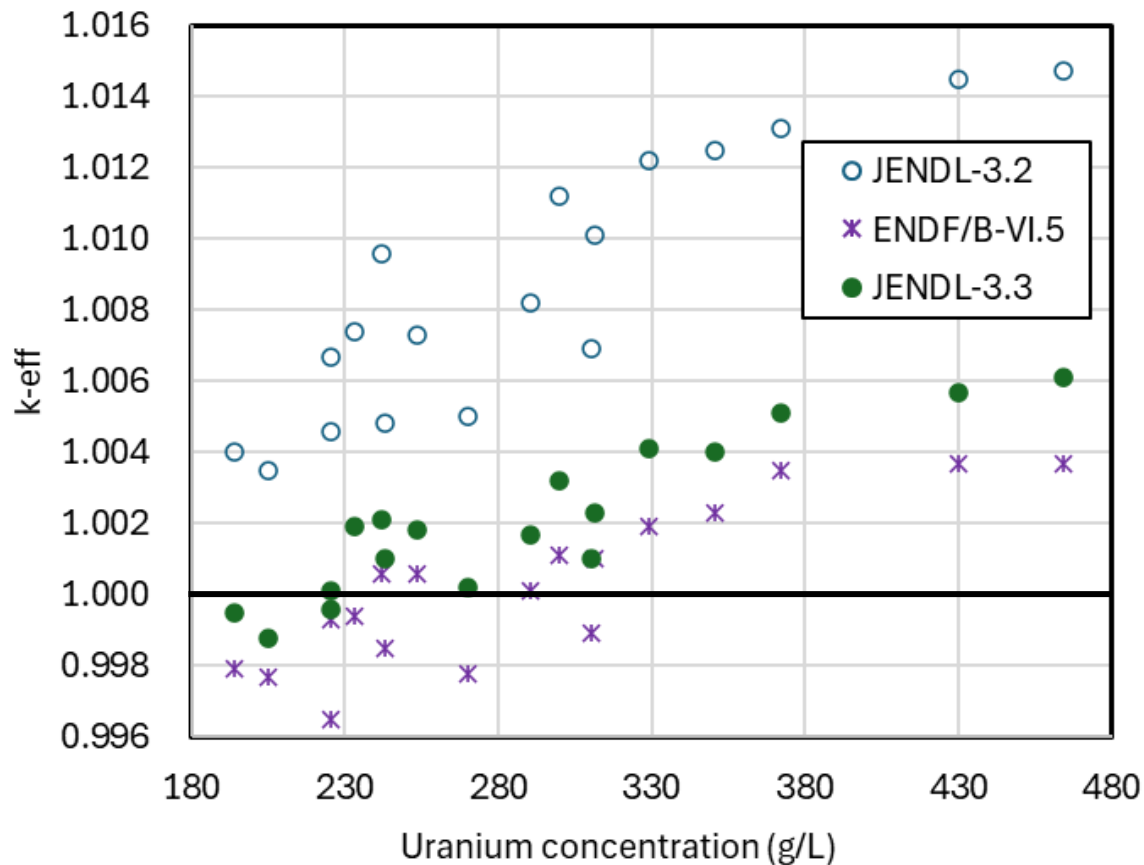
最大過剰反応度: 0.8ドル



【7】 出典：日本原子力研究所原研40年史編集委員会編，
原研四十年史，1996，提供：日本原子力研究開発機構

STACYの成果の一例

溶液中のウラン濃度を変化させた臨界体系を複数構築し、異なる評価済み核データファイルを用いて予測を行った。核データファイルJENDL-3.2では系統的な過大評価と予測の偏り(バイアス)のウラン濃度依存性が見られていたが、新しいファイルJENDL-3.3で改善されていることが分かる。



STACY更新炉の計画

・2006年頃から始まった「原子カルネサンス」の流れを受けて、STACYを次世代軽水炉で使用するU-235濃縮度5wt%超燃料の核特性確認試験の研究に使用するため、2011年2月にSTACYの炉心を軽水炉タイプの炉心に更新する原子炉設置変更許可申請が提出された。

・その後、2011年3月の福島第1原子力発電所事故で発生した燃料デブリの臨界安全管理に用いる手法やデータの妥当性を検討するための実験を行う目的で、原子力規制庁からの受託事業としてSTACYの更新計画が継続されることになった。

STACYの更新作業



更新前の溶液系STACY [8]



解体撤去された溶液系STACY [9]



炉心タンク(上側)搬入 [10]



ダンプ槽搬入 [11]

[8] [9] [10] [11] 出典：曾根 浩樹，定常臨界実験装置STACYの更新改造と運転再開，日本原子力学会炉物理部会会報「炉物理の研究」，第78号，2025.3，提供：日本原子力研究開発機構

STACY更新炉の完成

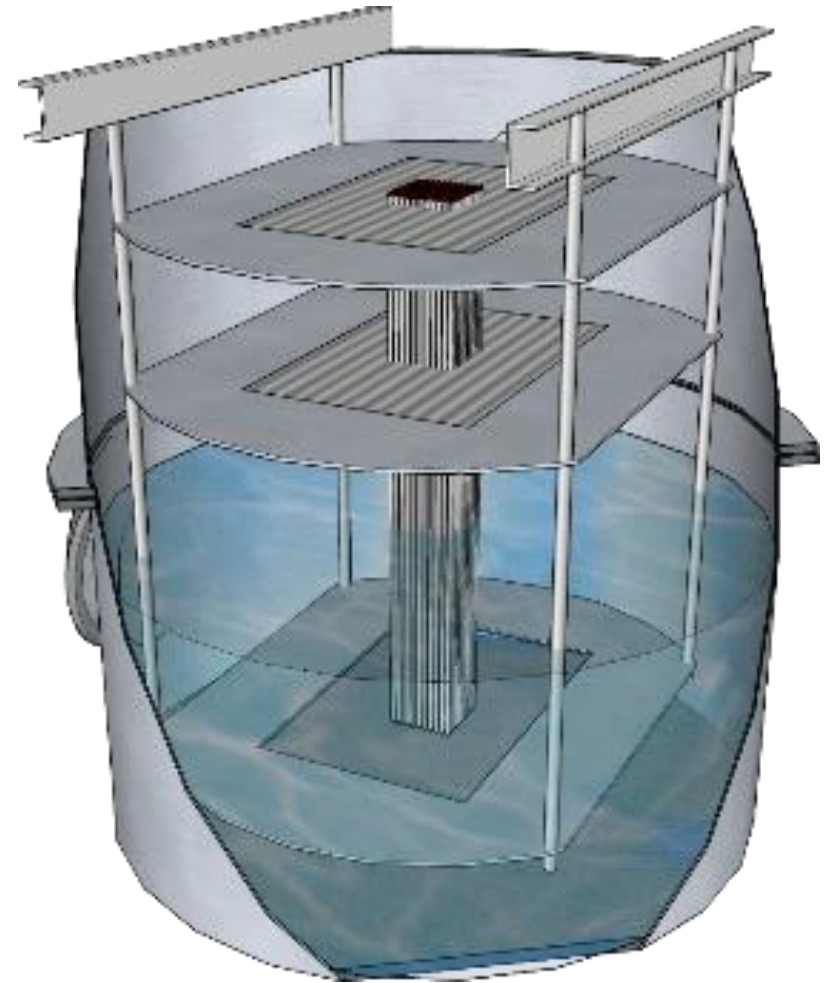


【12】 出典：曾根 浩樹，定常臨界実験装置STACYの更新改造と運転再開，日本原子力学会炉物理部会会報「炉物理の研究」，第78号，2025.3，
提供：日本原子力研究開発機構

STACY更新炉の外観



【13】 出典：日本原子力研究開発機構安全研究センターホームページ
(<https://www.jaea.go.jp/04/anzen/tool/csrg/device/stacy.html>)



【14】 出典：日本原子力研究開発機構 原子力科学研究所 臨界ホット試験技術部，STACY施設 設工認（実験用装荷物の製作及びデブリ模擬炉心の新設）説明資料（資料2），第470回核燃料施設等の新規制基準適合性に係る審査会合（2023年1月30日実施）

STACY更新炉での初臨界(2024年4月22日)



初臨界を達成したときの制御室の様子

【15】出典：曾根 浩樹，定常臨界実験装置STACYの更新改造と運転再開，日本原子力学会炉物理部会会報「炉物理の研究」，第78号，2025.3，提供：日本原子力研究開発機構

出典一覧

No.	ライセンス	出典情報
【1】	+	PHITS開発チーム
【2】	+	Evaluation of Neutron Nuclear Data on Arsenic-75 for JENDL-4, Keiichi SHIBATA, Go CHIBA, Akira ICHIHARA and Satoshi KUNIEDA, Journal of Nuclear Science and Technology Volume 47 Issue 1, copyright © 2010 Atomic Energy Society of Japan, reprinted by permission of Informa UK Limited, trading as Taylor & Francis Group, www.tandfonline.com on behalf of Atomic Energy Society of Japan.
【3】	+	日本原子力研究所原研史編纂委員会編集, 日本原子力研究所史, 2005, 提供: 日本原子力研究開発機構
【4】	+	日本原子力研究所原研史編纂委員会編集, 日本原子力研究所史, 2005, 提供: 日本原子力研究開発機構
【5】	+	京都大学複合原子力科学研究所ホームページ (https://www.rri.kyoto-u.ac.jp/facilities/ca)
【6】	+	京都大学複合原子力科学研究所ホームページ (https://www.rri.kyoto-u.ac.jp/facilities/ca)
【7】	+	日本原子力研究所原研40年史編集委員会編, 原研四十年史, 1996, 提供: 日本原子力研究開発機構
【8】	+	曾根 浩樹, 定常臨界実験装置STACYの更新改造と運転再開, 日本原子力学会炉物理部会会報「炉物理の研究」, 第78号, 2025.3, 提供: 日本原子力研究開発機構
【9】	+	曾根 浩樹, 定常臨界実験装置STACYの更新改造と運転再開, 日本原子力学会炉物理部会会報「炉物理の研究」, 第78号, 2025.3, 提供: 日本原子力研究開発機構
【10】	+	曾根 浩樹, 定常臨界実験装置STACYの更新改造と運転再開, 日本原子力学会炉物理部会会報「炉物理の研究」, 第78号, 2025.3, 提供: 日本原子力研究開発機構

出典一覧

No.	ライセンス	出典情報
【11】	+	曾根 浩樹, 定常臨界実験装置STACYの更新改造と運転再開, 日本原子力学会炉物理部会会報「炉物理の研究」, 第78号, 2025.3, 提供: 日本原子力研究開発機構
【12】	+	曾根 浩樹, 定常臨界実験装置STACYの更新改造と運転再開, 日本原子力学会炉物理部会会報「炉物理の研究」, 第78号, 2025.3, 提供: 日本原子力研究開発機構
【13】	+	日本原子力研究開発機構安全研究センターホームページ (https://www.jaea.go.jp/04/anzen/tool/csrg/device/stacy.html)
【14】	+	日本原子力研究開発機構 原子力科学研究所 臨界ホット試験技術部, STACY施設 設工認 (実験用装荷物の製作及びデブリ模擬炉心の新設) 説明資料 (資料2), 第470回核燃料施設等の新規制基準適合性に係る審査会合 (2023年1月30日実施)
【15】	+	曾根 浩樹, 定常臨界実験装置STACYの更新改造と運転再開, 日本原子力学会炉物理部会会報「炉物理の研究」, 第78号, 2025.3, 提供: 日本原子力研究開発機構