

中性子捕獲断面積と核データ

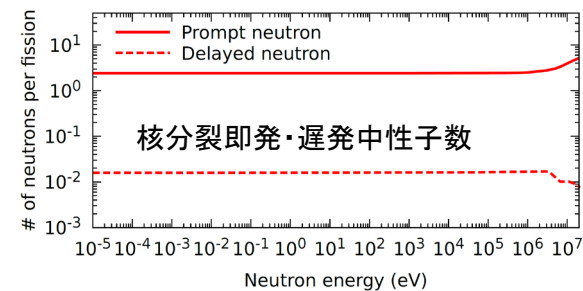
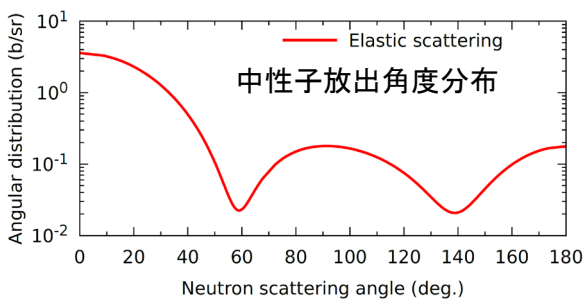
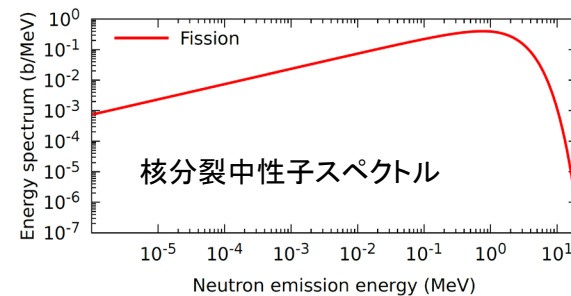
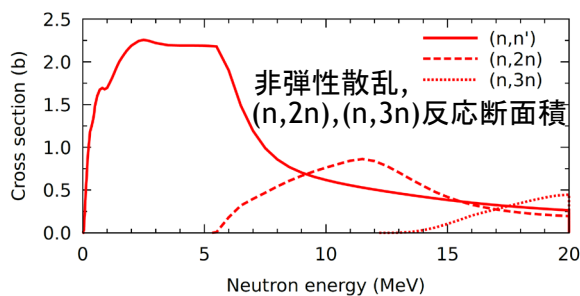
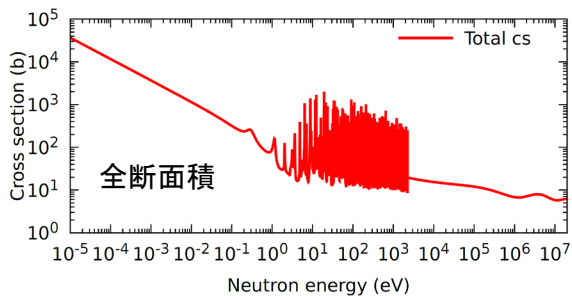
岩本信之

JAEA

1

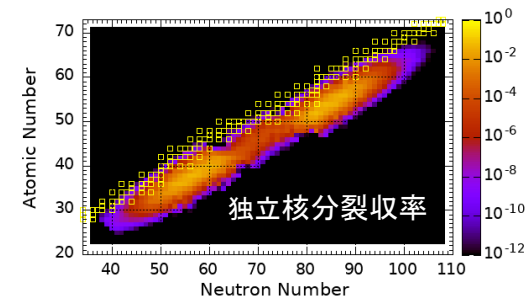
核データ

- 原子核・原子との相互作用に関するデータ
 - 日本ではJAEAが評価済核データライブラリ(JENDL)を開発
https://wwwndc.jaea.go.jp/jendl/j5/j5_J.html



JENDL-5
2021年12月公開

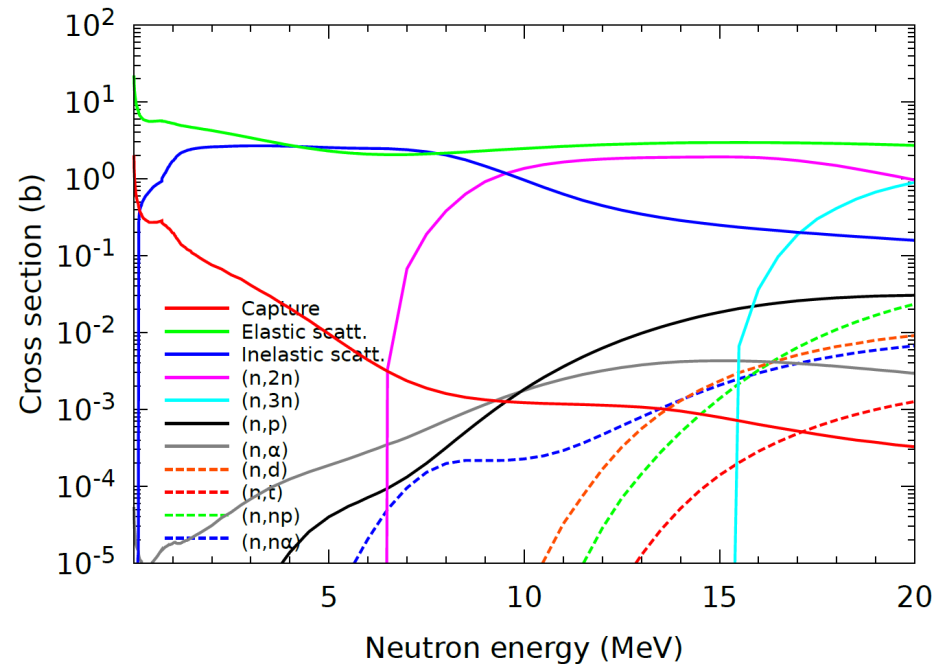
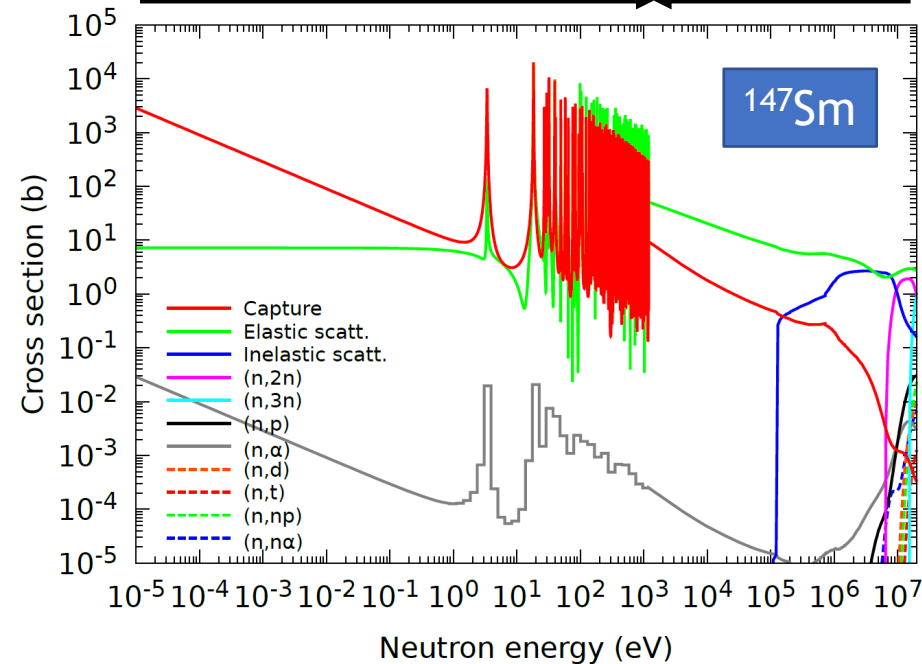
- 中性子サブライブラリ, 795核種
- 熱中性子散乱則サブライブラリ
- 核分裂収率サブライブラリ
- 崩壊データサブライブラリ
- 陽子サブライブラリ, 239核種
- 重陽子サブライブラリ, 9核種
- アルファ粒子サブライブラリ, 18核種
- 光核反応サブライブラリ, 2685核種
- 光子-原子サブライブラリ
- 電子-原子サブライブラリ
- 原子緩和サブライブラリ



中性子捕獲断面積と他の反応断面積

高速中性子
エネルギー
領域

(分離) 共鳴領域



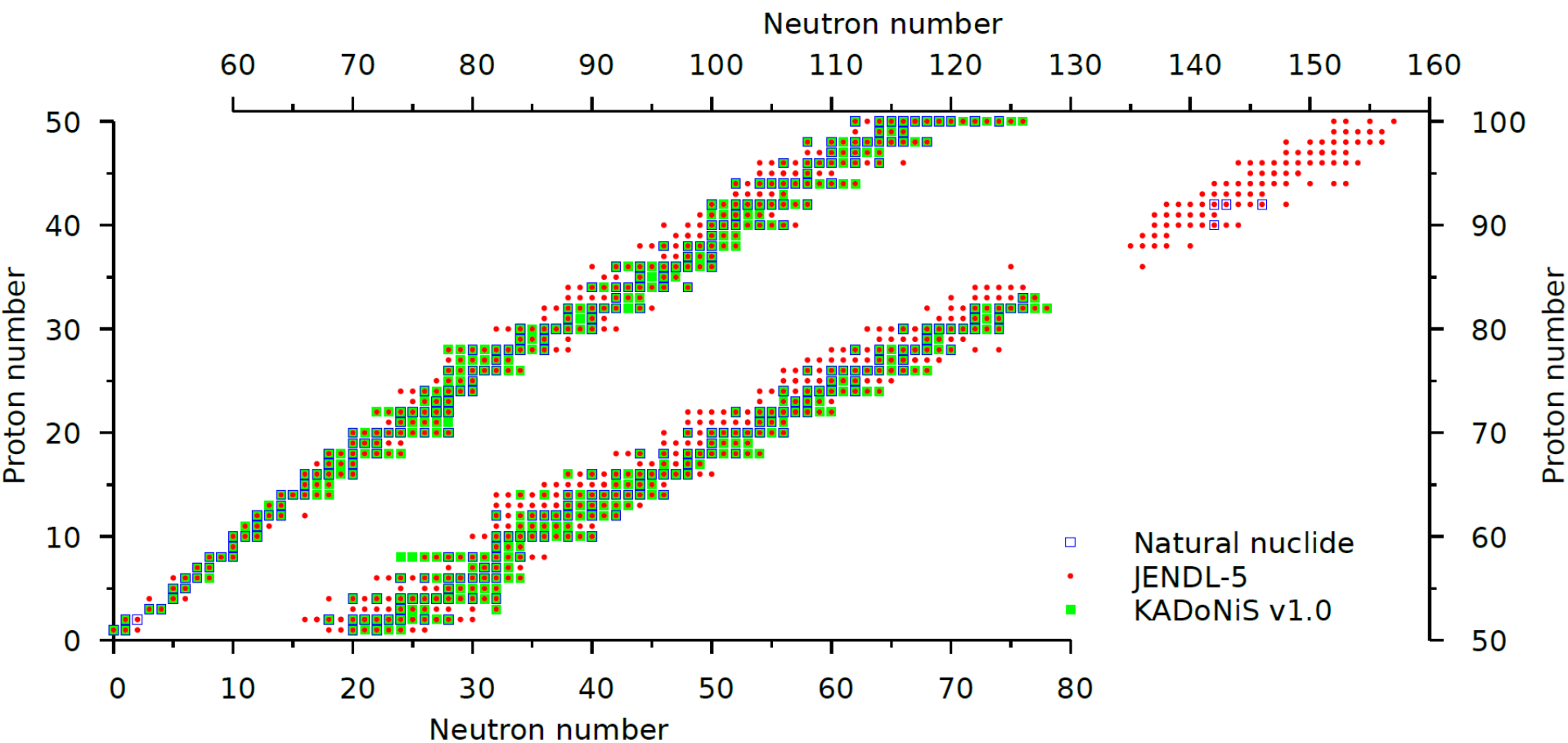
- 捕獲断面積は多くの反応断面積のうちの一つ
- 競合反応の断面積を考慮した導出が不可欠

(中性子捕獲)断面積データベース

- マックスウェル平均断面積 (MACS)、反応率データ
 - KADoNiS : Bao et al. (ADNDT, 76, 70, 2000);
Dillmann et al. (PoS, 057, 2015) **実験データ+核反応(統計)モデル**
 - Reaclib : Rausher & Thieleman (ADNDT, 75, 1, 2000);
Cyburt et al. (ApJS, 189, 240, 2010) : **NON-SMOKER**
 - BRUSLIB : Xu, Goriery et al. (A&A, 549, A106, 2013) : **TALYS**
 - JENDL-3.3 : Nakagawa et al. (ADNDT 91, 77, 2005)
 - ENDF/B-VII.1 : Pritychenko & Mughabghab (Nucl. Data Sheets, 113, 3120, 2012)
 - ENDF/B-VII.0 : Pritychenko, Mughabghab, Sonzogni (ADNDT 96, 645, 2010)

- **JENDL-5** : O.Iwamoto, N.Iwamoto et al. (JNST, 60, 1, 2023) : **CCONE**
 - 断面積実験データを再現

KADoNiS v1.0とJENDL-5の収録核種比較



中性子捕獲断面積の導出

① 捕獲断面積の中性子エネルギー依存性を導出

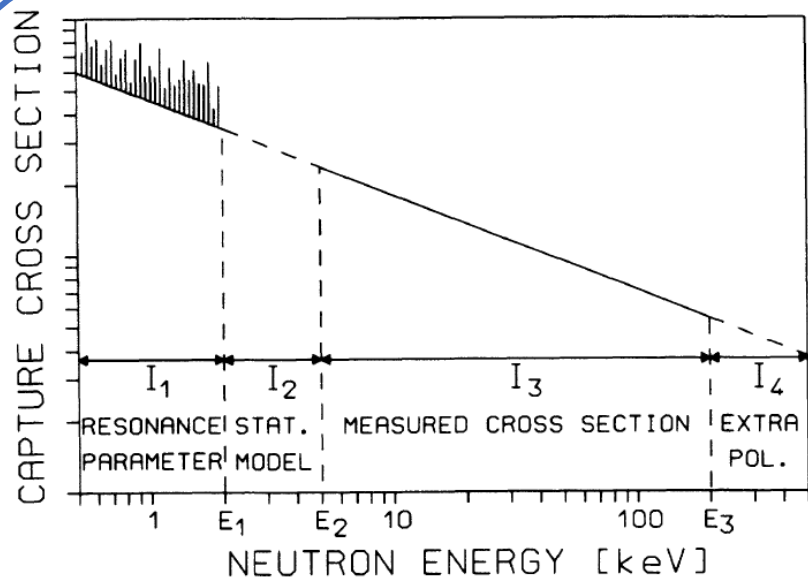
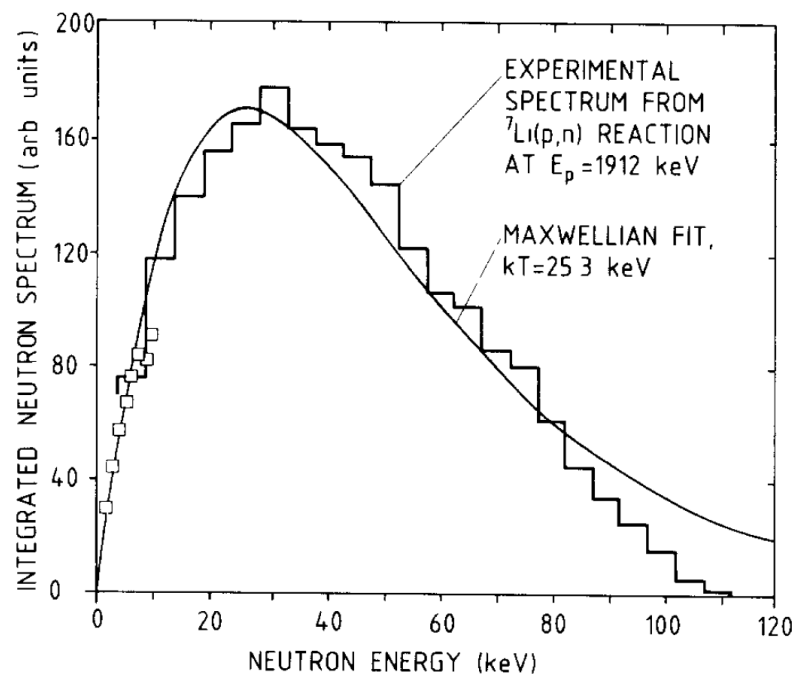


FIG. 10. Subdivision of the neutron energy range for the determination of Maxwellian averaged cross sections.

(Wisshak et al. PRC, 42, 1731, 1990)

② マックスウェル分布に似た中性子放出スペクトルを持つ反応を利用



(Beer et al. NIMA, 337, 492, 1994)

マックスウェル分布で平均

マックスウェル平均断面積

捕獲断面積の中性子エネルギー依存性を導出

- JENDL開発では①で断面積を導出
 - 共鳴領域(共鳴パラメータの導出)
 - 高速中性子エネルギー領域(共鳴領域より高いエネルギー領域)
 - ただし、断面積の測定データが無ければ②(マックスウェル平均断面積)を規格化に利用

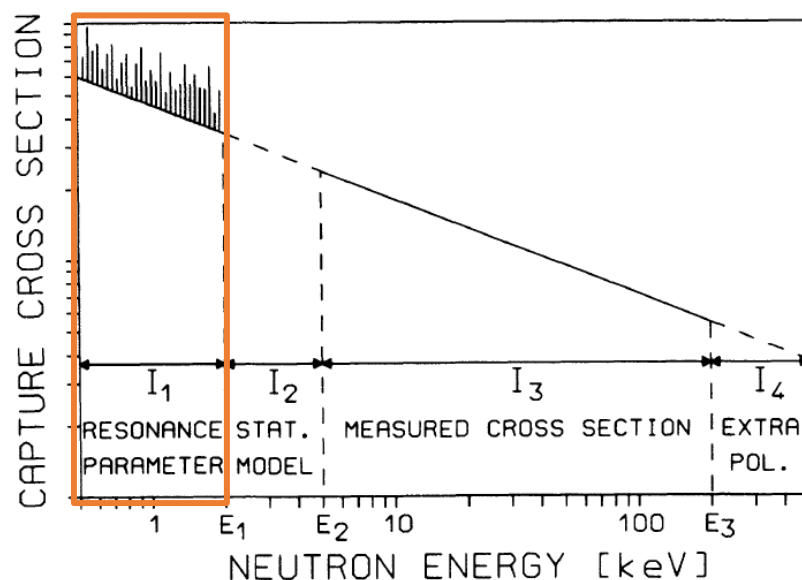


FIG. 10. Subdivision of the neutron energy range for the determination of Maxwellian averaged cross sections.

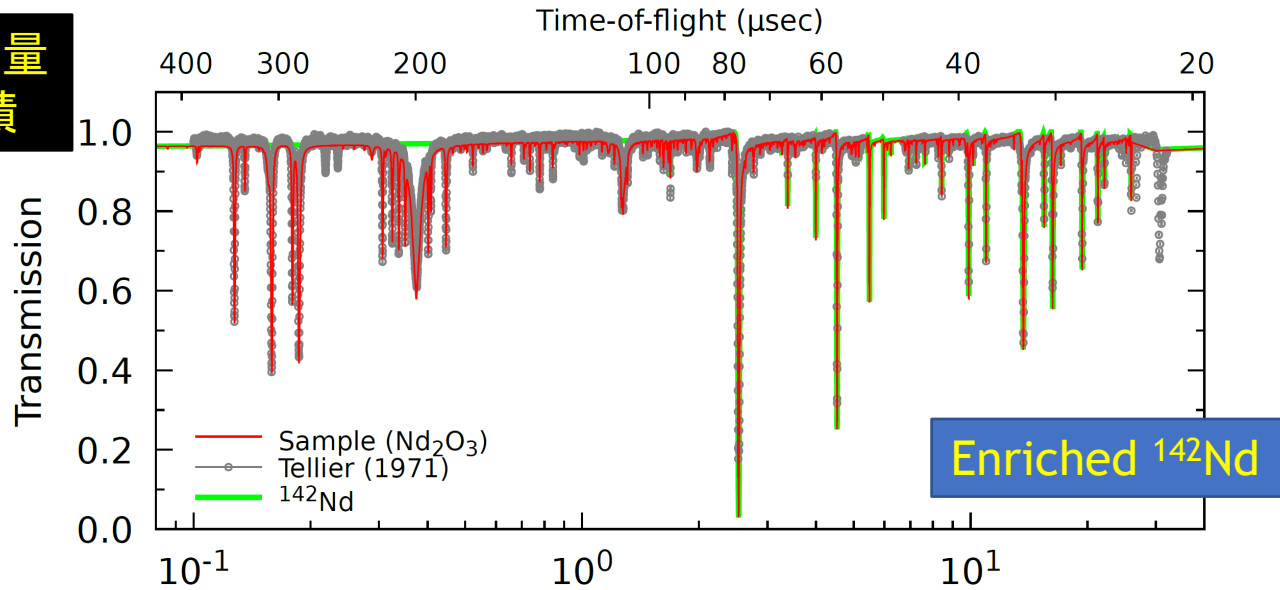
(Wisshak et al. PRC, 42, 1731, 1990)

捕獲断面積のエネルギー依存性：共鳴領域

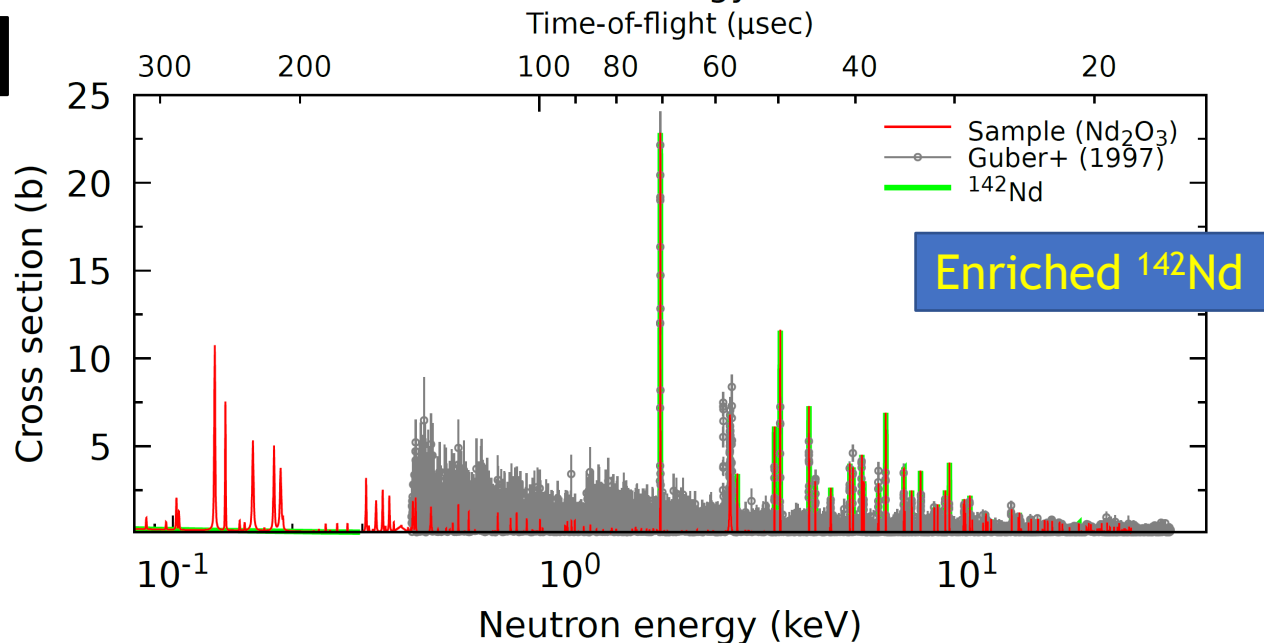
- パルス中性子源を用いた飛行時間 (Time-of-flight) 法による実験
 - 中性子発生から中性子もしくはガンマ線が検出器へ到達する時間に対する中性子透過量や捕獲ガンマ線収量を測定
 - 時間—エネルギー変換 $E = \left(\frac{72.3 L(\text{m})}{t(\mu\text{s})} \right)^2$, L : 飛行距離, t : 到達時間
 - 共鳴断面積モデルで測定データを解析し、共鳴パラメータを導出
 - 共鳴パラメータ
 - エネルギー E_r
 - 軌道角運動量 L
 - スピン J
 - 中性子幅 Γ_n
 - 捕獲幅 Γ_γ
 - アルファ幅 Γ_α
 - 核分裂幅 Γ_f
 -

捕獲断面積のエネルギー依存性：共鳴領域

中性子透過量
→ 全断面積



捕獲断面積



共鳴パラメータ

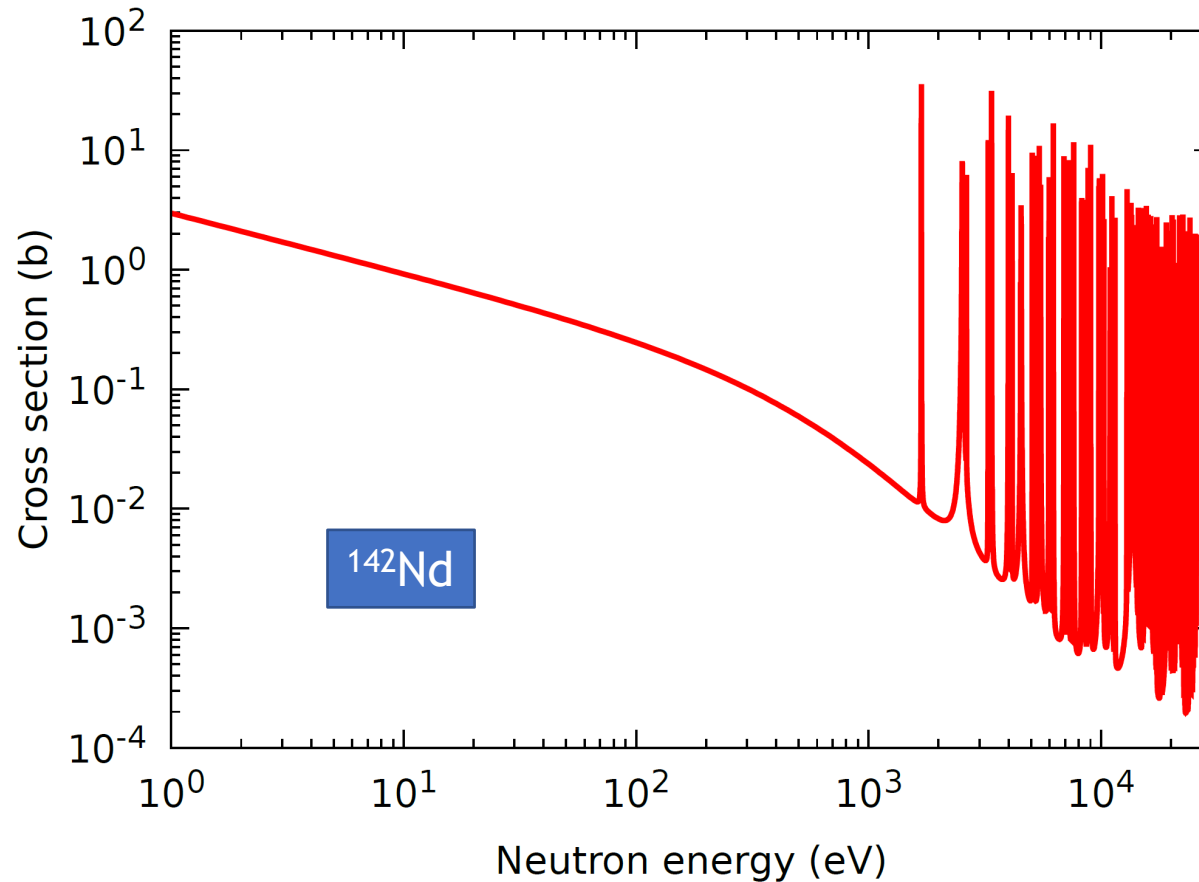
^{142}Nd

E_r (eV)	L	J	Γ_n (eV)	Γ_γ (eV)	E_r (eV)	L	J	Γ_n (eV)	Γ_γ (eV)
1687.6	0	1/2	0.050	0.078	7627.0	0	1/2	0.600	0.095
2528.5	0	1/2	9.520	0.078	8261.0	0	1/2	0.533	0.043
2636.8	1	1/2	0.012	0.050	8423.0	0	1/2	1.944	0.053
3271.0	1	1/2	0.064	0.046	8806.0	1	3/2	0.284	0.041
3382.0	0	1/2	0.343	0.067	9019.0	0	1/2	0.192	0.349
3996.0	0	1/2	0.828	0.055	9793.0	0	1/2	0.290	0.074
4145.0	1	1/2	0.085	0.026	9840.0	1	3/2	0.250	0.039
4510.0	1	1/2	0.002	0.025	9885.0	0	1/2	11.840	0.085
4532.0	0	1/2	7.572	0.050	10153.0	1	3/2	0.540	0.046
5063.0	1	3/2	0.078	0.026	10295.0	1	1/2	0.066	0.057
5156.0	1	3/2	0.090	0.025	10961.0	0	1/2	10.540	0.052
5426.0	1	3/2	0.098	0.034	11140.0	1	3/2	0.090	0.036
5491.0	0	1/2	3.305	0.051	11261.0	1	1/2	0.109	0.045
5958.0	1	1/2	0.038	0.010	11485.0	1	1/2	0.210	0.049
5982.0	0	1/2	1.437	0.047	12937.0	1	3/2	0.526	0.047
6236.0	1	3/2	0.122	0.088	13450.0	1	3/2	0.096	0.044
6927.0	0	1/2	0.575	0.079	13524.0	0	1/2	4.282	0.101
6955.0	1	1/2	0.072	0.034	13663.0	0	1/2	89.450	0.135
7246.0	0	1/2	0.548	0.056	14265.0	1	1/2	0.190	0.061

捕獲断面積

$$\sigma_{n,\gamma}^l(E) = \frac{\pi}{k^2} \sum_J g_J \sum_{r=1}^{\text{NR}_J} \frac{\Gamma_{nr} \Gamma_{\gamma r}}{(E - E'_r)^2 + \frac{1}{4}\Gamma_r^2}$$

(分離)共鳴領域の中性子捕獲断面積



捕獲断面積の中性子エネルギー依存性を導出

- JENDL開発では①で断面積を導出
 - 共鳴領域(共鳴パラメータの導出)
 - 高速中性子エネルギー領域(共鳴領域より高いエネルギー領域)

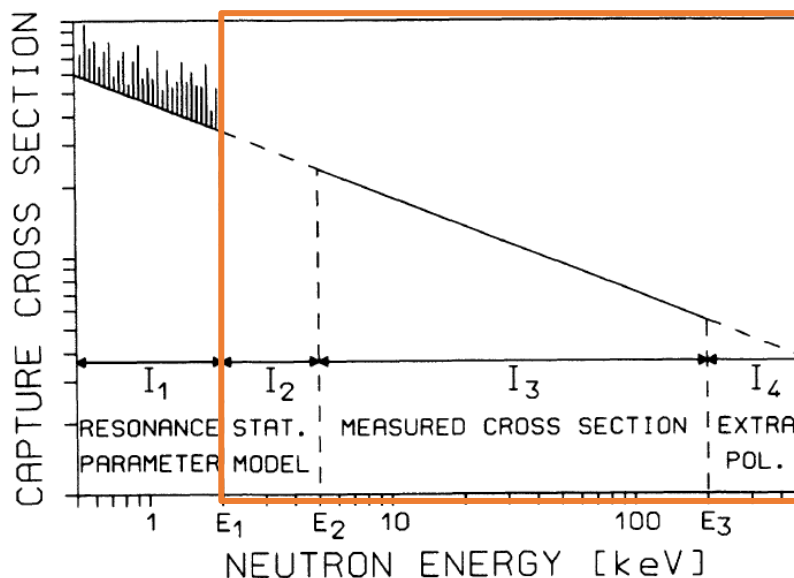
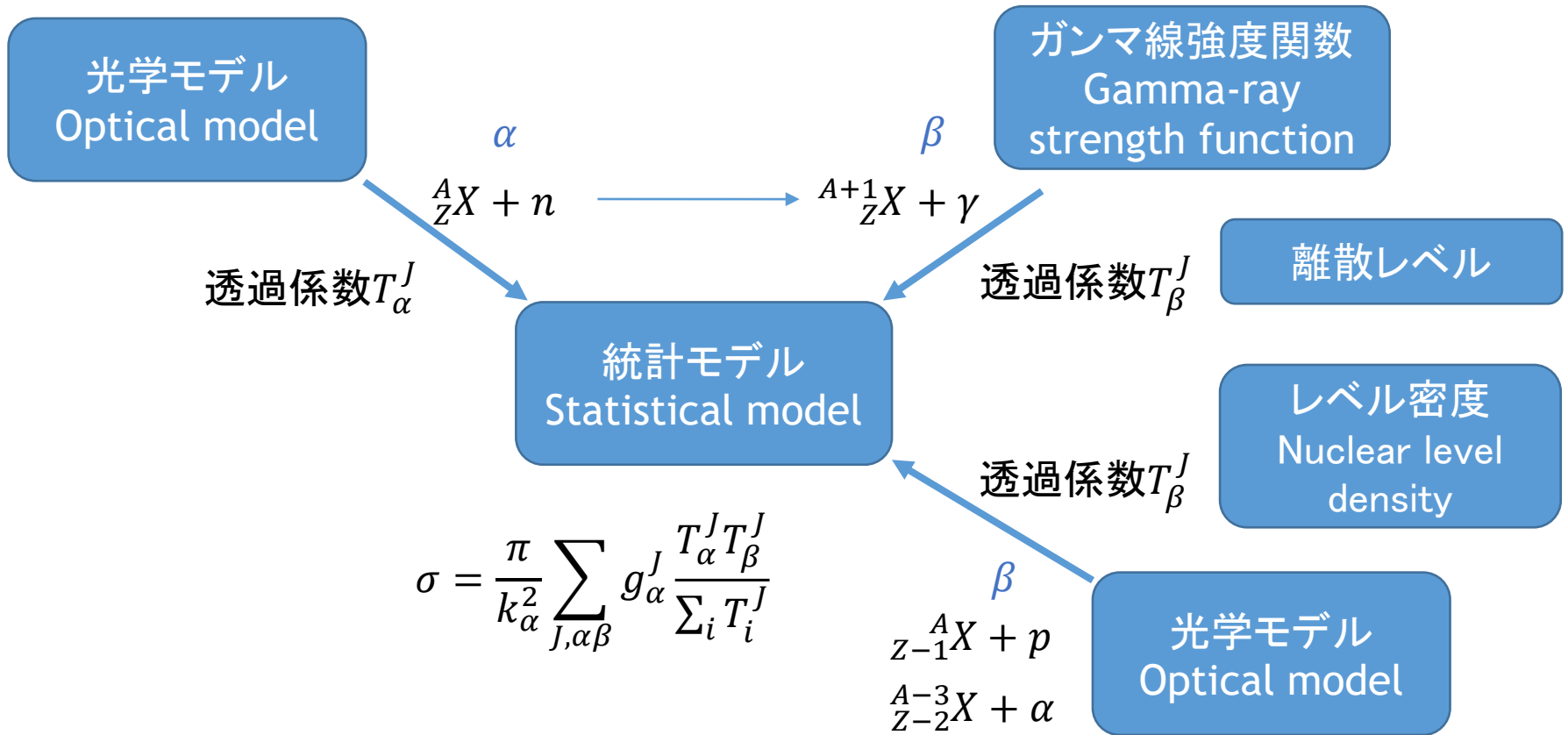


FIG. 10. Subdivision of the neutron energy range for the determination of Maxwellian averaged cross sections.

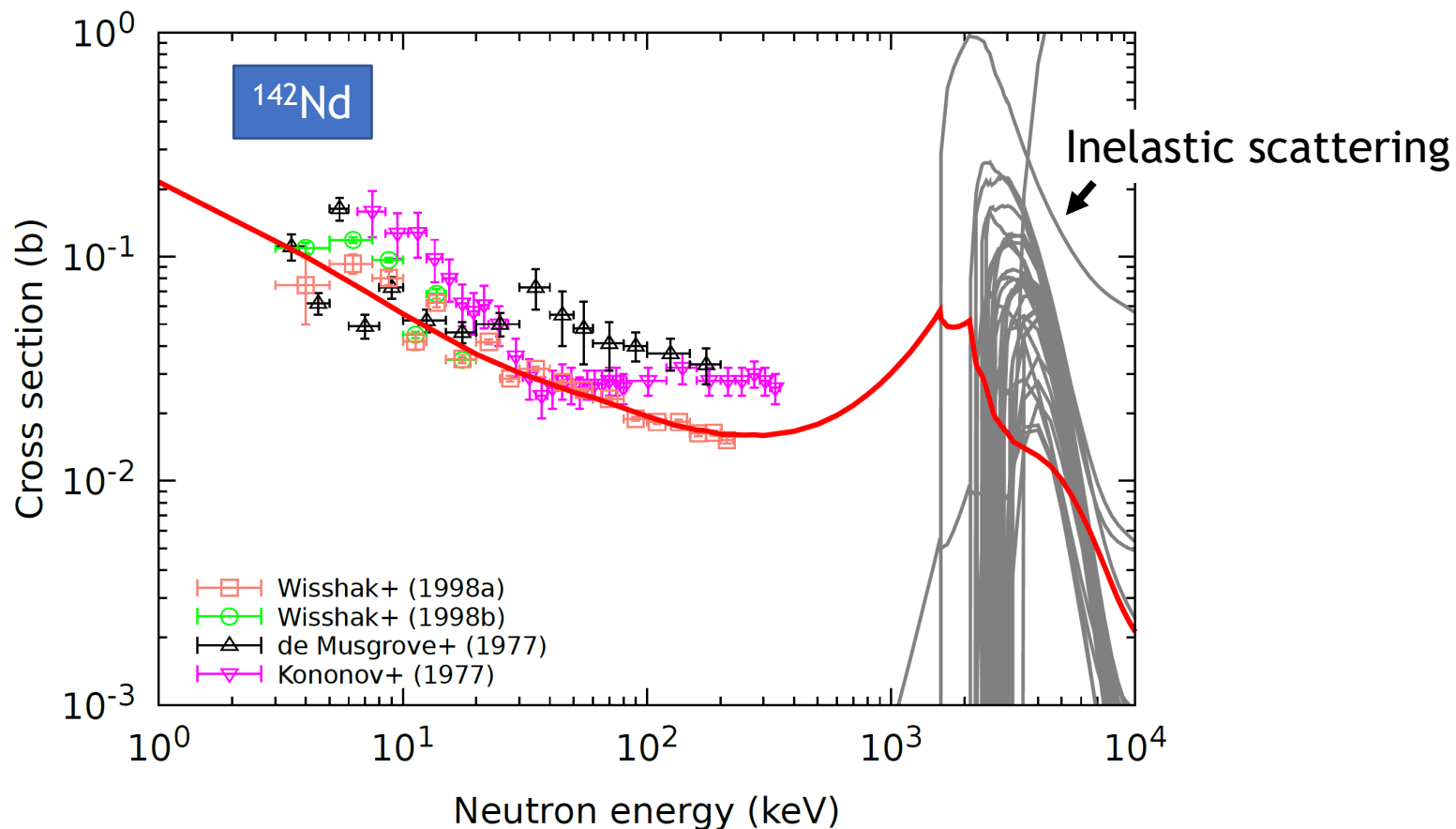
(Wisshak et al. PRC, 42, 1731, 1990)

高速中性子エネルギー領域

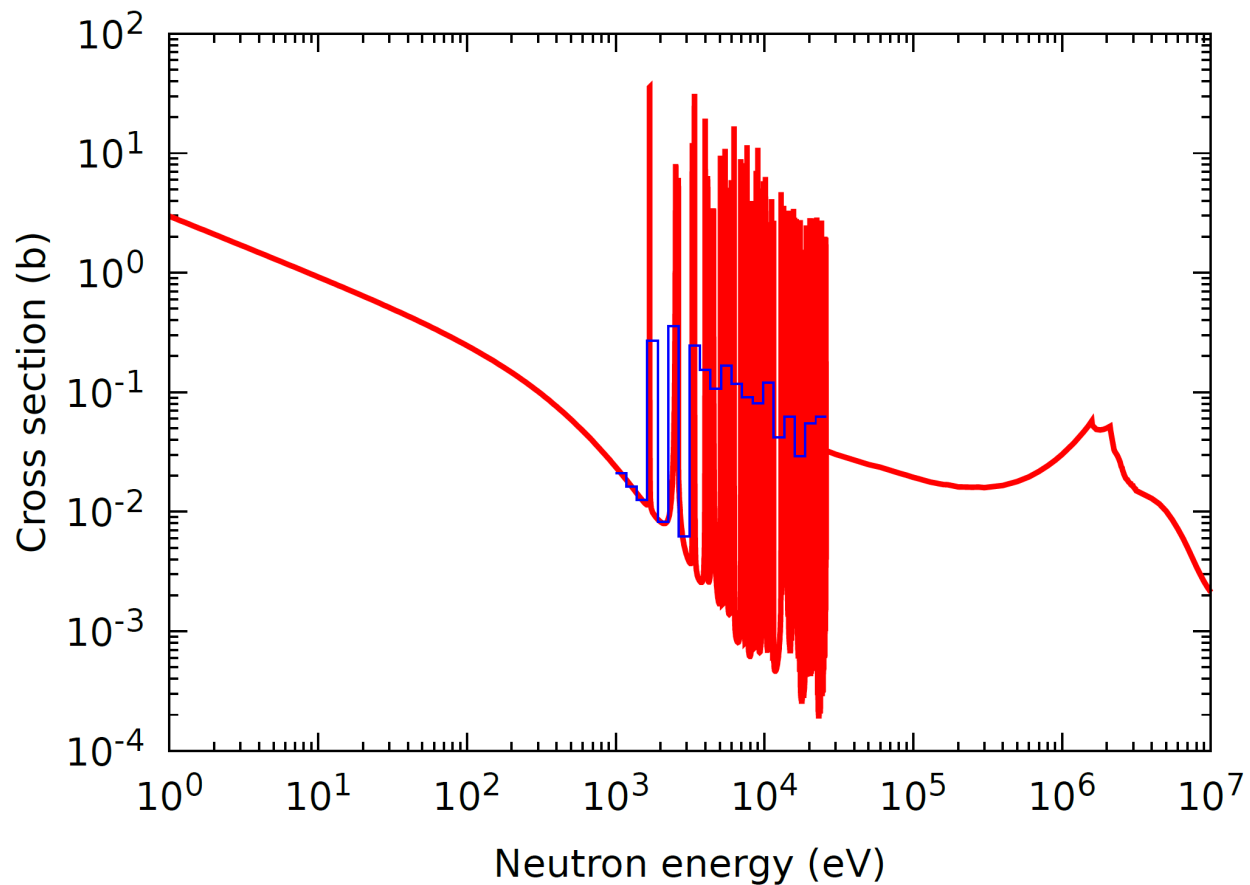
- 光学モデルや統計モデルによる計算



高速中性子エネルギー領域の中性子捕獲断面積



領域全体の中性子捕獲断面積



MACSの導出

- 恒星内の熱運動→Maxwell & Boltzman分布
- Nakagawa et al. (ADNDT, 91, 77, 2005)

$$\sigma_{\text{Maxw}}(kT) = \frac{\langle \sigma v \rangle}{v_T}$$

$$\langle \sigma v \rangle = \sqrt{\frac{8}{\pi\mu}} \frac{1}{(kT)^{3/2}} \int E \sigma(E) e^{-\frac{E}{kT}} dE$$

$$\sigma_{\text{Maxw}}(kT) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} (kT)^{-2} \int_0^{\infty} \sigma(E) E e^{-\frac{E}{kT}} dE$$



重心系エネルギー

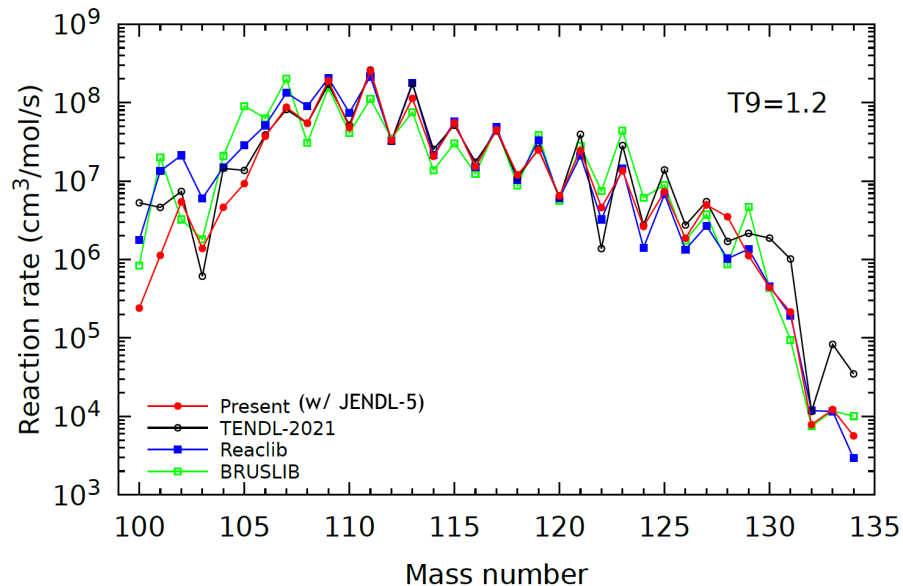
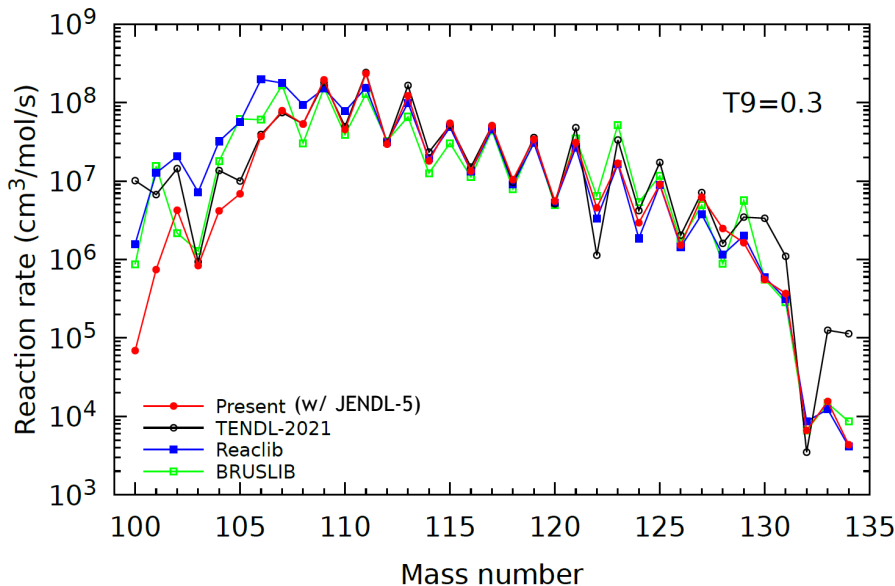
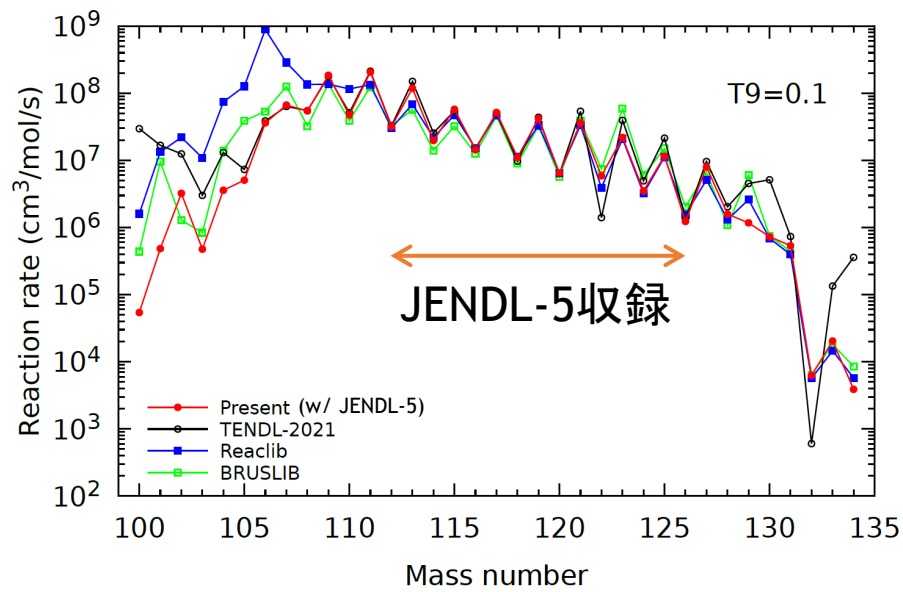
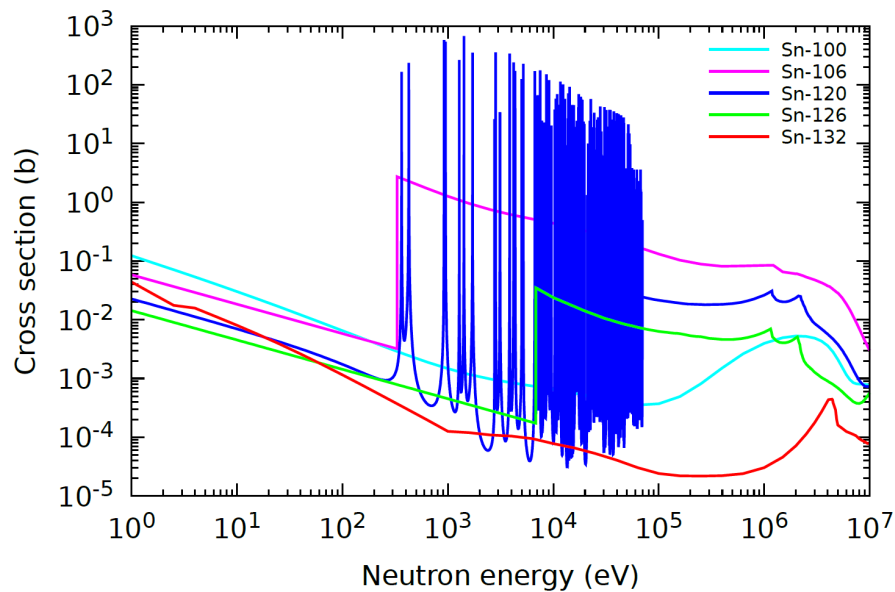
$$E = aE_n^L \equiv \frac{m_2}{m_1 + m_2} E_n^L$$

$$\sigma_{\text{Maxw}}(kT) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \frac{a^2}{(kT)^2} \int_0^{\infty} \sigma(E_n^L) E_n^L e^{-\frac{aE_n^L}{kT}} dE_n^L$$



JENDL断面積(実験室系エネルギー)

A Sn 捕獲反応率の系統性



まとめ

- 原子核・原子との相互作用に関するデータである評価済核データライブラリ(JENDL)を開発

- JENDL-5 (2021年12月公開)



https://www.ndc.jaea.go.jp/jendl/j5/j5_J.html

- マックスウェル平均断面積を公開予定
 - 捕獲、 (n,p) 、 (n,α) 、核分裂反応
- 中性子捕獲断面積の導出方法を紹介
- 中性子捕獲断面積を元にしたマックスウェル平均断面積を他のライブラリと比較
 - KADoNiSは測定データをベースとしており、JENDL-5と一致度は高い
 - 統計モデル計算ベースのデータとは差異が大きいケース有
 - ^{17}O の共鳴断面積(JENDL-5)に直接捕獲反応成分を加えると、10keV以上で断面積が増大
→ $T9 > 0.2$ でZhang et al.より大きな反応率の可能性有