

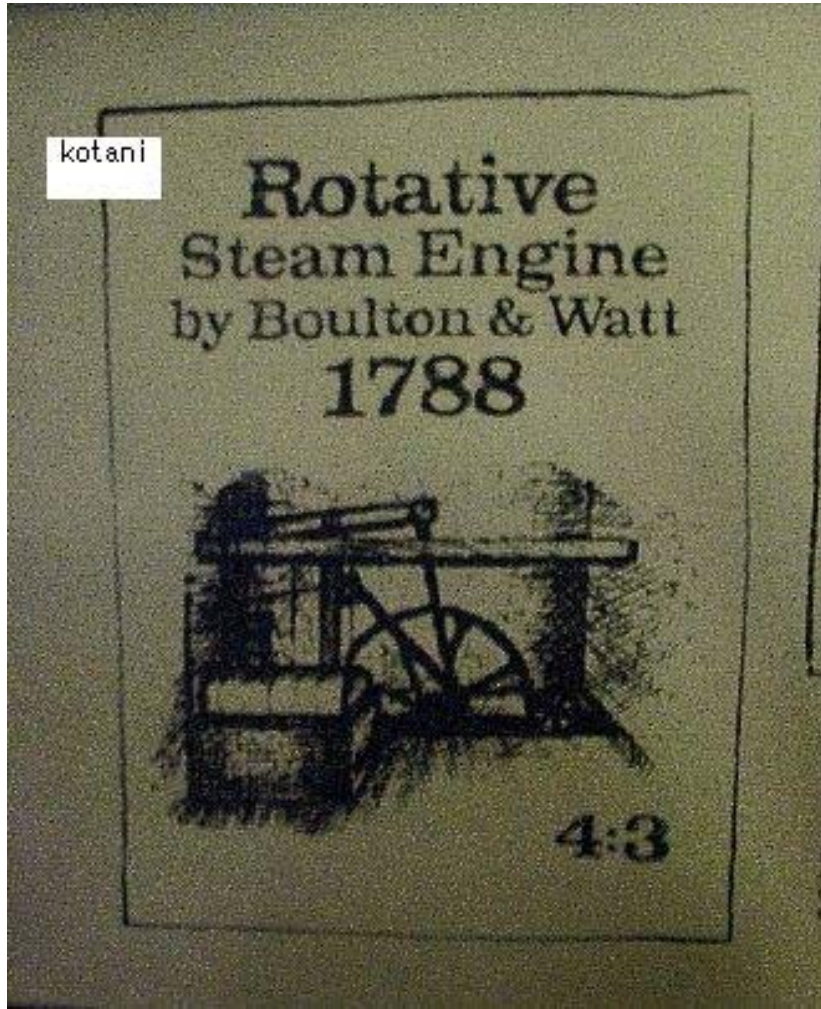
原子力と核物理の接点

エネルギー源としての観点から
—研究者としての視点から

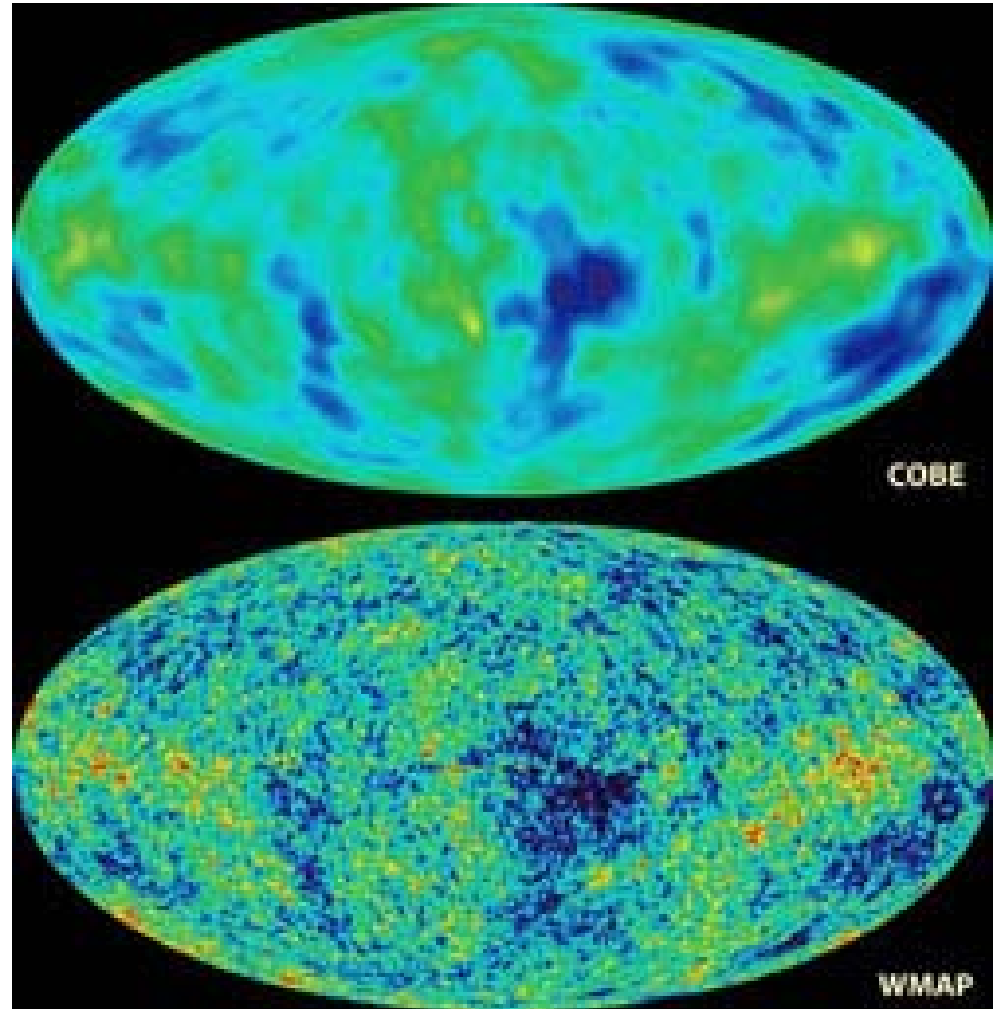
千葉 敏

日本原子力研究開発機構

物理と社会の関わりりの歴史

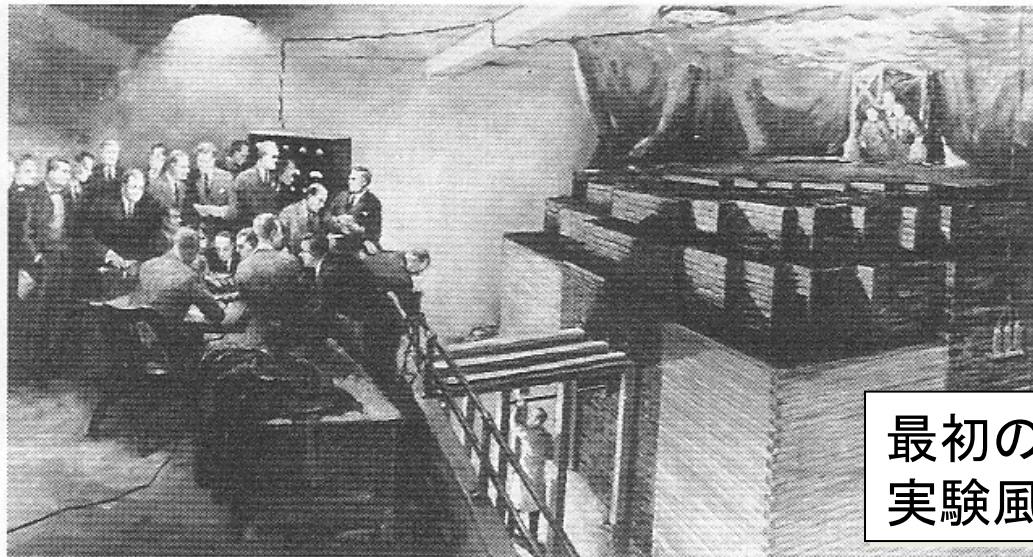
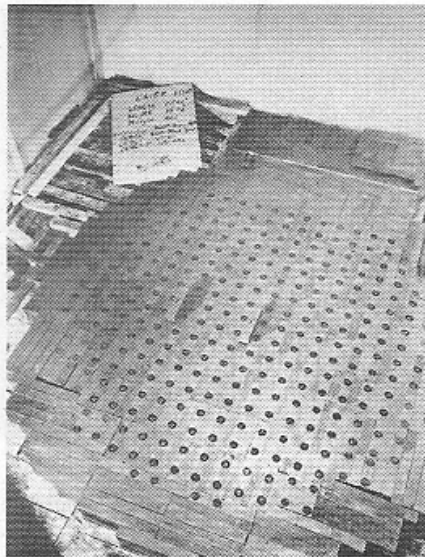


産業革命と熱力学



溶鉱炉の温度→プランク分布→量子論

世界初の原子炉 CP-1 (1942) @シカゴ大



最初の原子炉臨界実験風景

現在の風景(モニュメント)

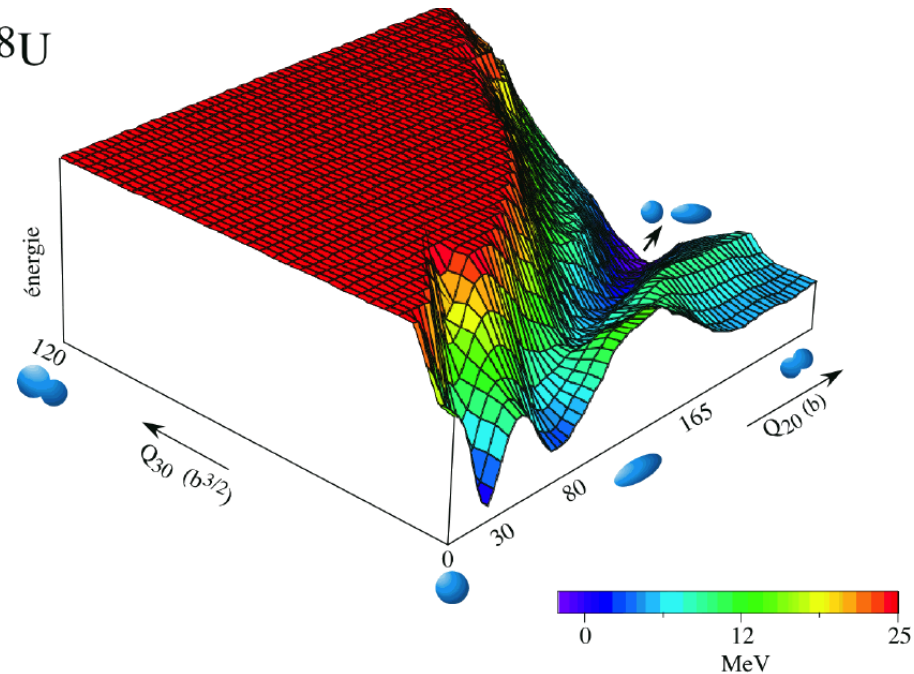


理論分野の状況:ヨーロッパ

核分裂の理論研究の新しい潮流

Goutte et al., Phys. Rev. C 71, 024316(2005)

- Constrained-HFBの方法でPESを ^{238}U 計算(右図)
- 時間依存生成座標の方法で、G.S.近傍にある波動関数の時間発展を計算
- Scissionラインを横切るフラックスの時間積分より核分裂生成物の質量分布を計算



完全な基礎研究でありながら、論文のまさに冒頭で、『核分裂研究は加速器駆動システムやThサイクル等の応用のために重要である』と述べている。

原子力に対する核物理の貢献の方法

● 奇抜なアイデアの提供

– 原子力屋が思いつかない突拍子もないアイデアで、新規な方法での原子核エネルギーの利用可能性、核廃棄物の処理方法を提案する

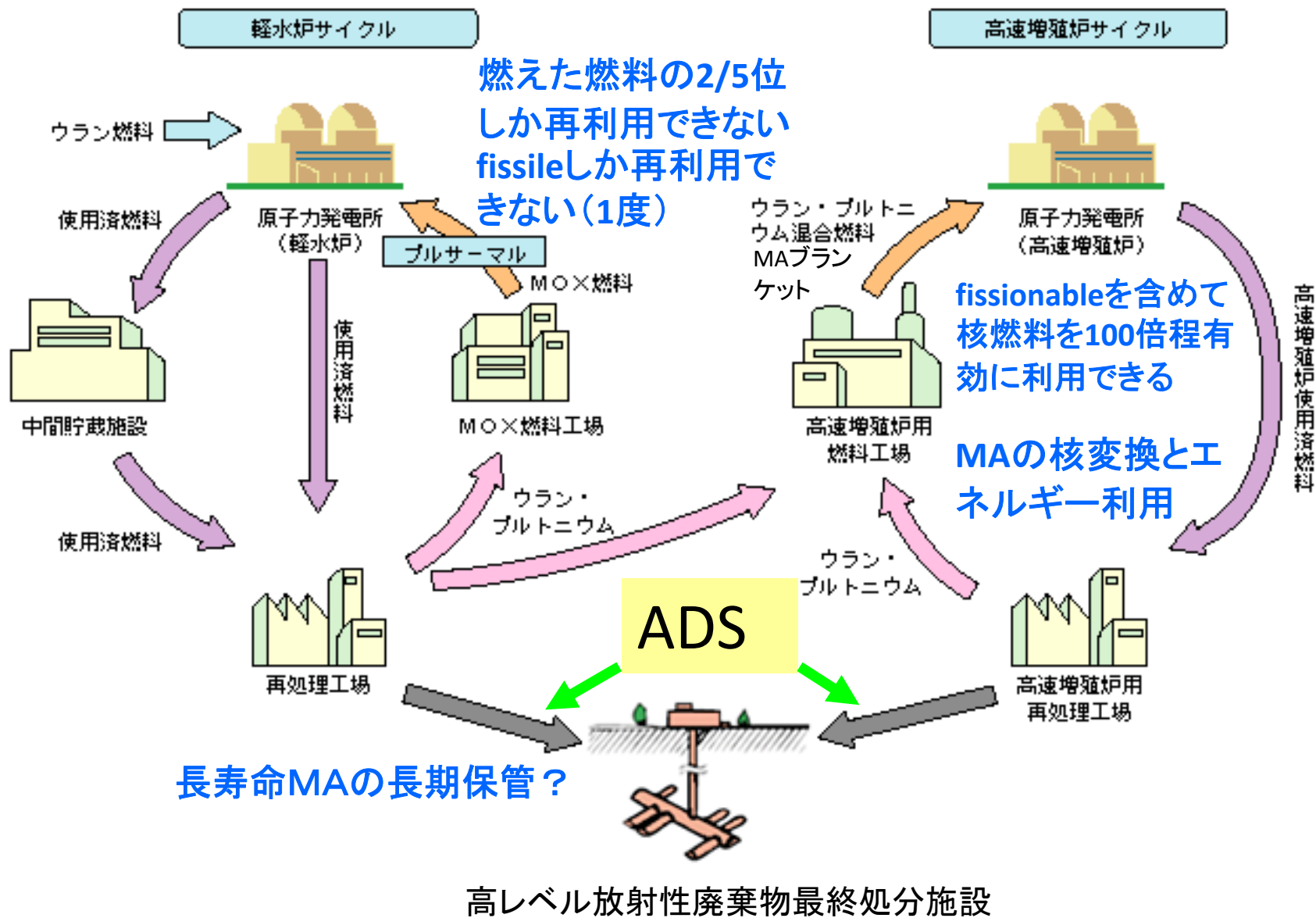
- 崩壊定数の操作(フラレン内包、多価イオン化、...)
- fertileからfissileを作る新しい方法の模索
- スレンジネスを利用する←ちょっとアイデア有り、等々

● 着実な方法

– 現在の原子力の枠組みの中で未解決の問題に対して解決方法を提案する

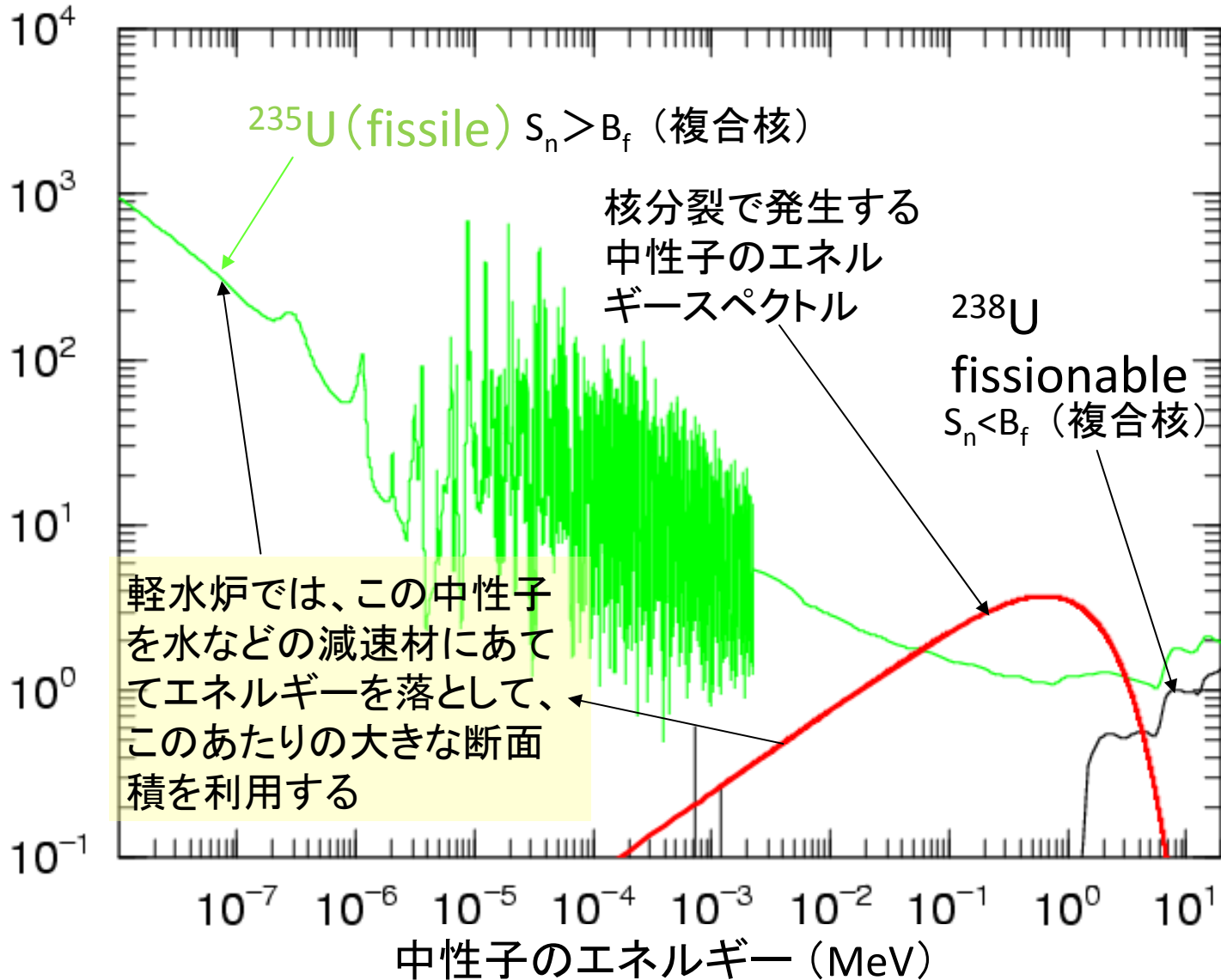
- 加速器技術
- 核データの測定、理論計算

原子力分野の目指している(ひとつの)姿

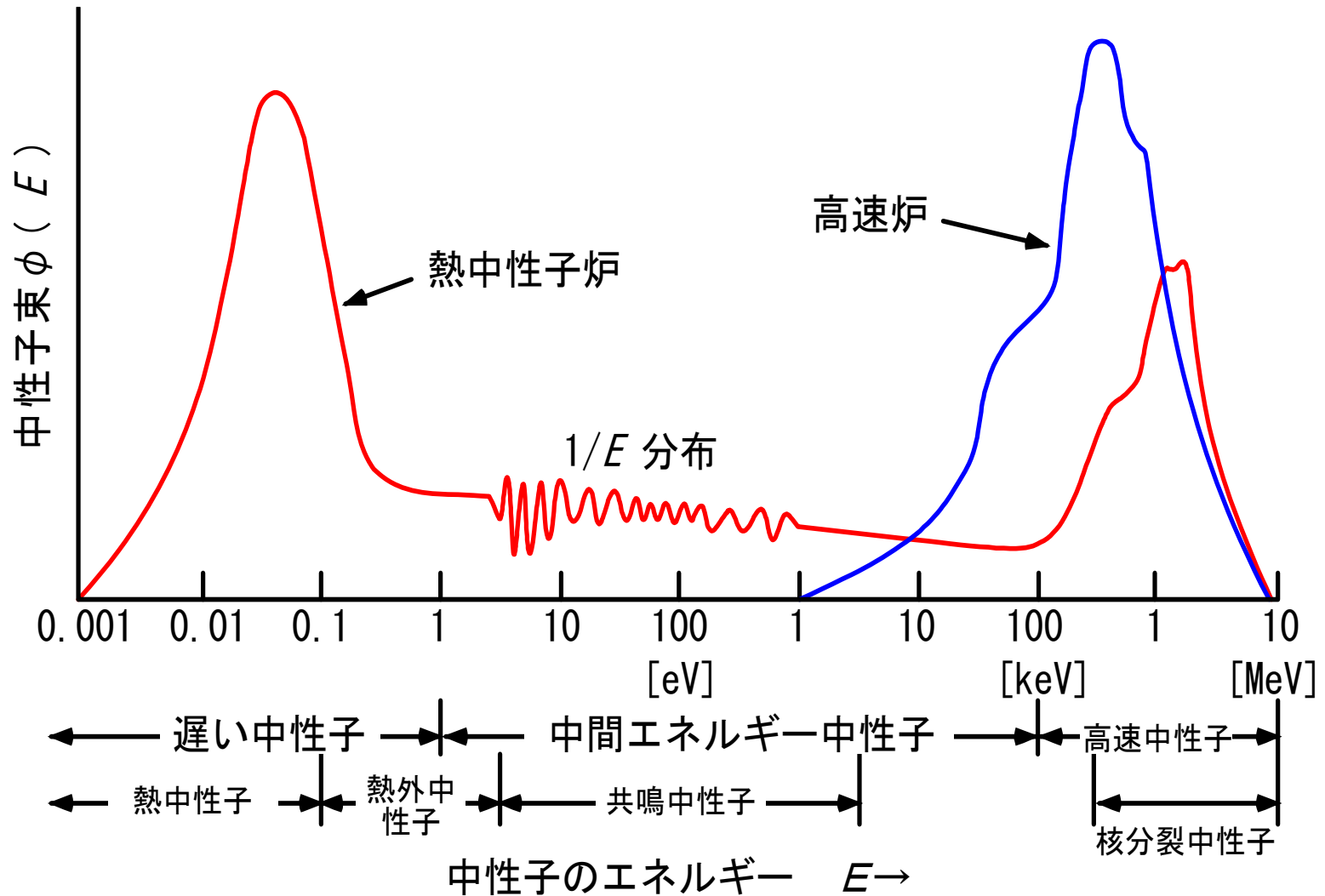


fissileとfissionableの違い

核分裂断面積(バーン)



FBRとPWR炉心中性子エネルギースペクトル



原子炉におけるアクチノイド核種の合成(燃焼)プロセス

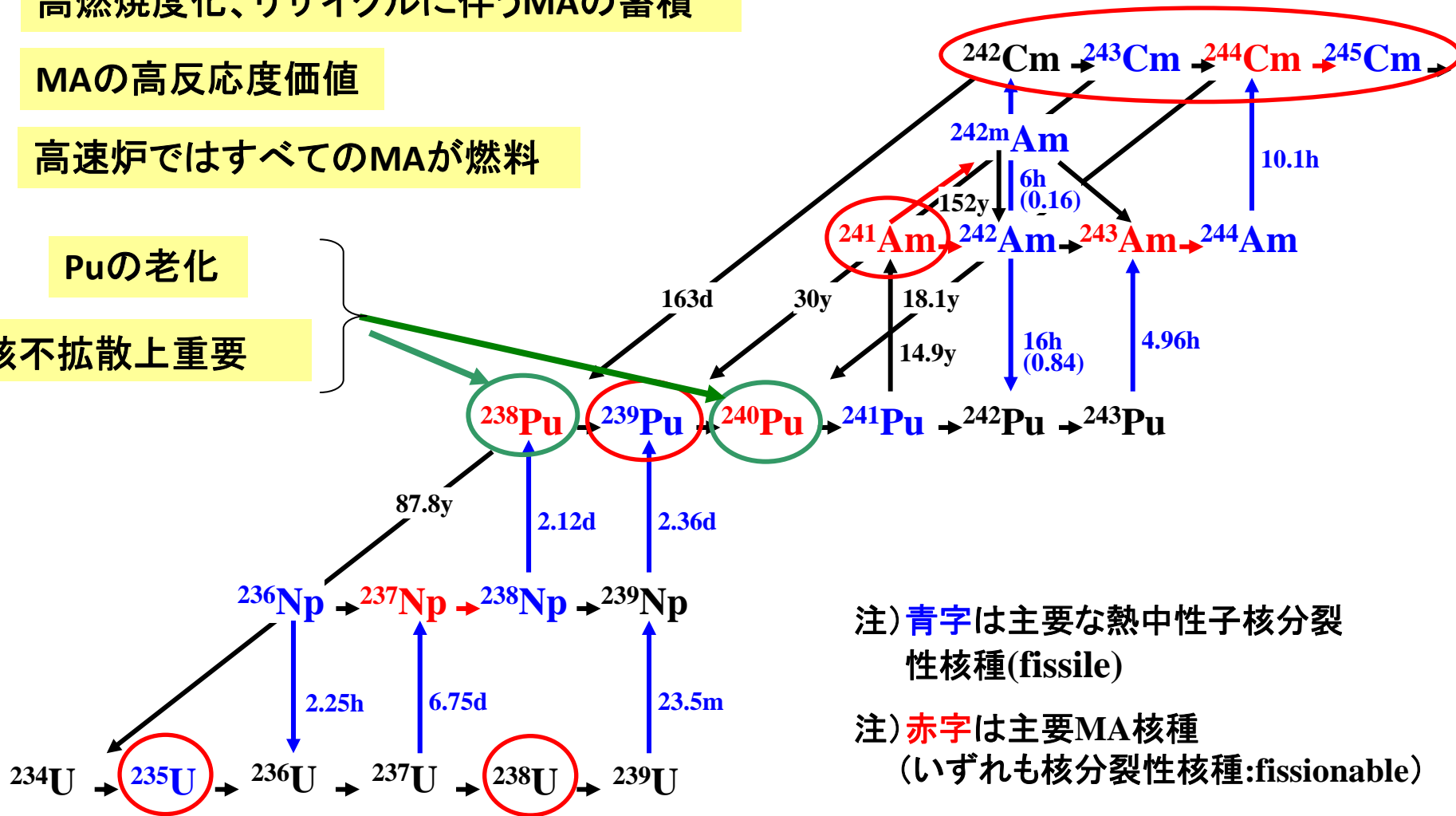
高燃焼度化、リサイクルに伴うMAの蓄積

MAの高反応度価値

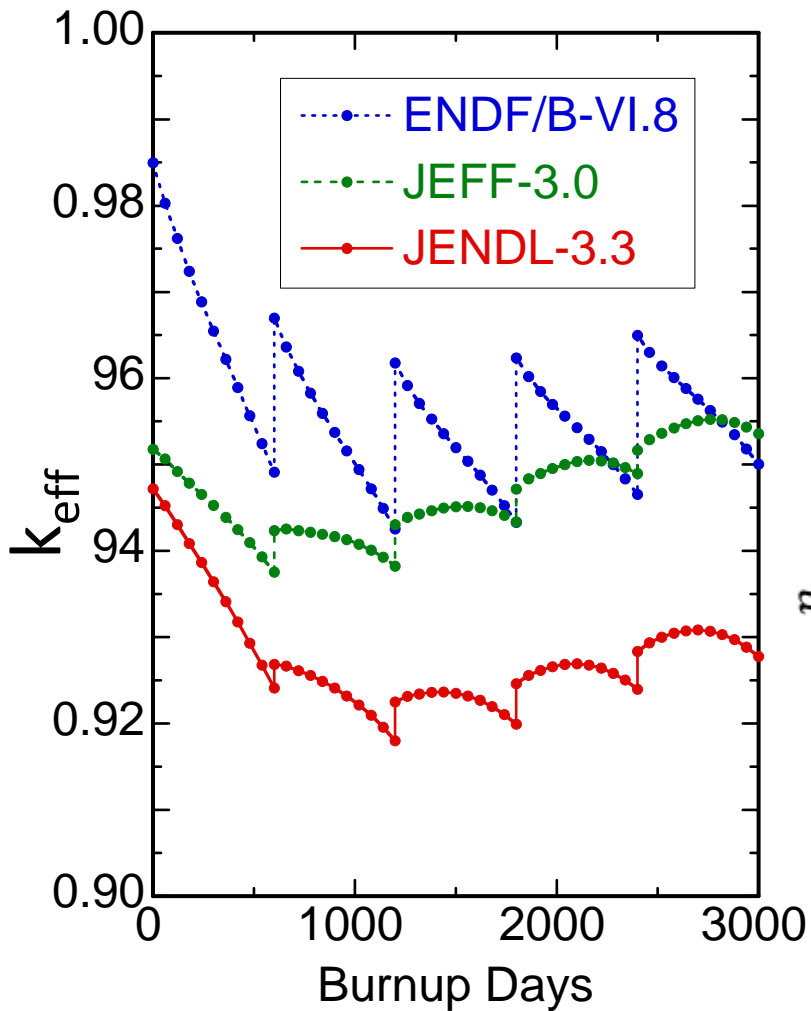
高速炉ではすべてのMAが燃料

Puの老化

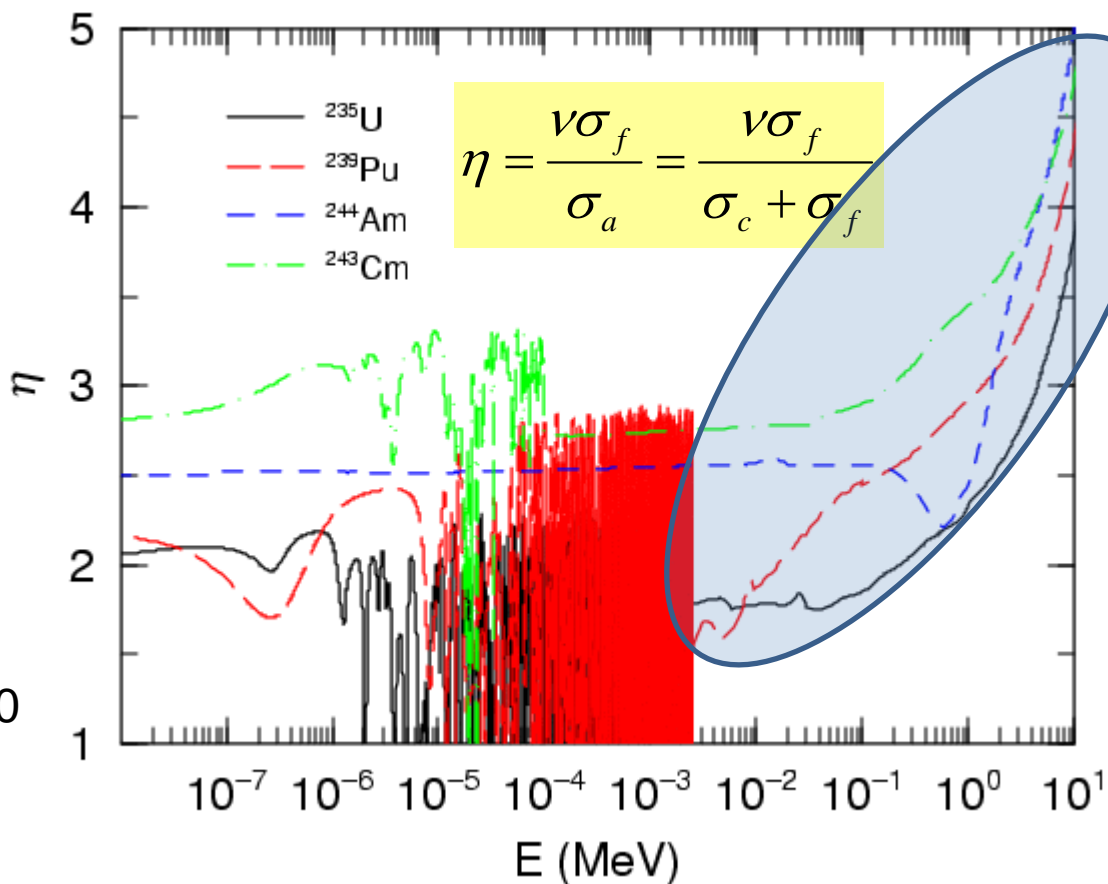
核不拡散上重要



MA (Minor Actinide) 領域の核データ： 高速炉体系に与える核的不確定性が非常に大きい



高速炉体系の臨界性における重要な因子： η

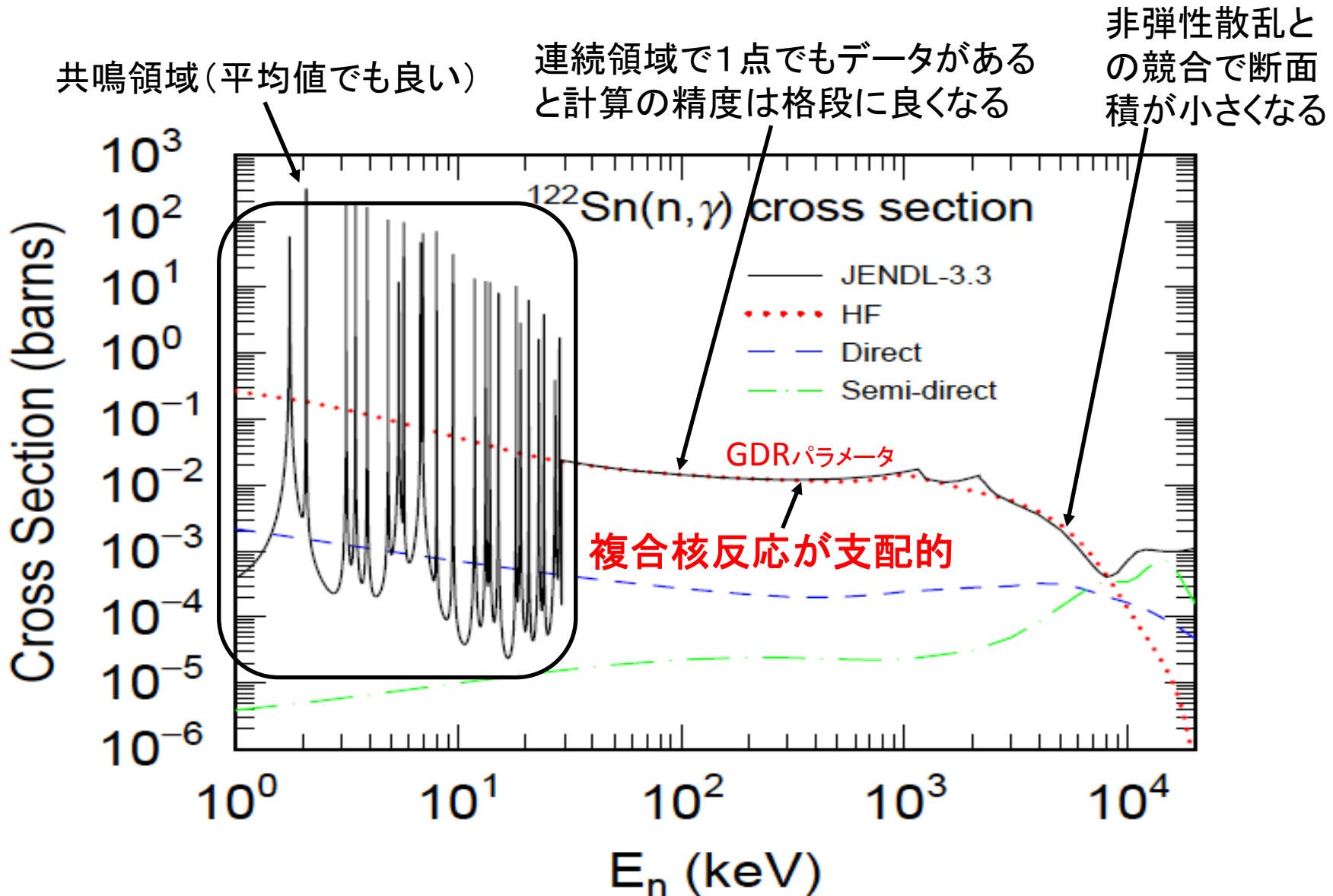


ADS体系(40%Pu+60%MA)における
実効増倍係数の燃焼度依存性

MA利用についての(個人的)見解

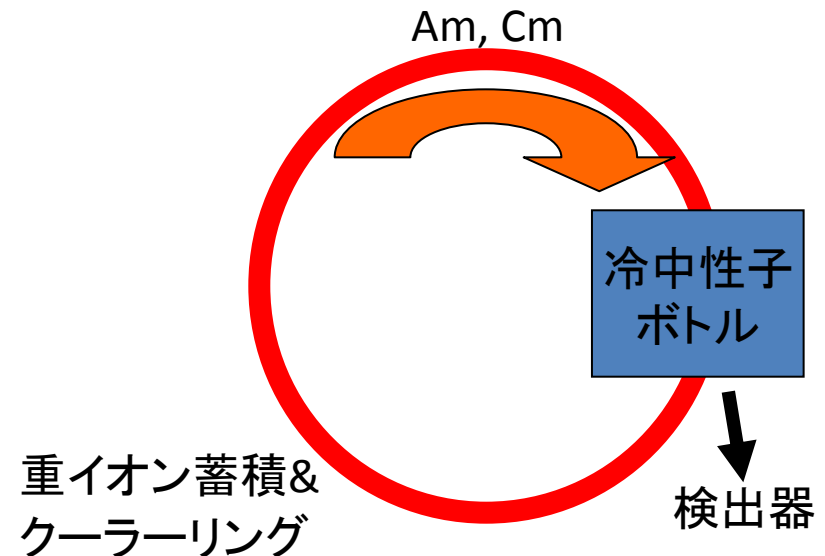
- 高速炉に基づく核燃料サイクルが実用化され、さらに高燃焼度化が図られれば、必然的に大量のMAが発生する
- MAは高い η 値を持ち、高い反応度価値を有する
- 従ってMAの核的特性を把握し適切に制御することが不可欠
- MAは ^{239}Pu 以上に優れた中性子増倍材であり、劣化ウラン、トリウムと混合して高速炉中で燃焼させることにより、Pu高速炉以上の核燃料の増殖(転換)が可能な有用物質
 - 先進核燃料サイクル
 - 核燃料物質の究極的な効率的利用、長寿命廃棄物の最小化
 - MAの核データが本質的に重要
- MAのガラス固化→地層処分、あるいはADSによる核変換は、何らかの理由でMAの利用が不可能という結論が出た際に考慮すべき最後の切り札
 - それを分ける要因の一つはMAの核データ

中性子捕獲断面積： ^{122}Sn

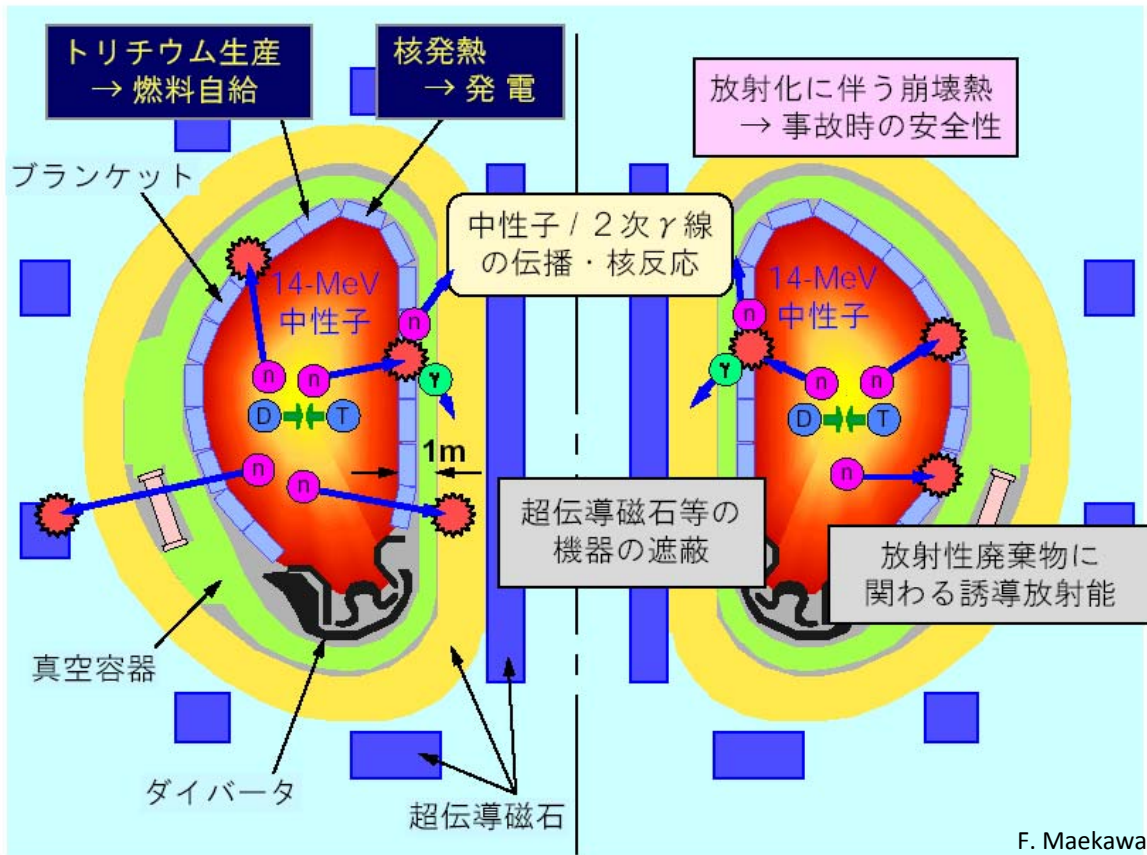


新規技術による核データ測定 奇抜な例

- 中性子による直接測定が不可能な短寿命核種の中
性断面積の逆運動学による測定
- 冷中性子ボトル + 重イオン蓄積 & クーラーリング
 - イオンのエネルギーを替えることで中性子エネルギーを変
化させる
- 実験技術、基礎研究としてもチャレンジング
 - s-process, r-process
- 原子力分野への適用
 - MA(Am, Cm, ...)
 - Fission Fragment
 - FF Yield : (N, Z) 分布
 - ν 、遅発中性子割合



核融合炉と軽核データ



核融合炉で重要な反応

$T(d,n)\alpha$: 燃料

$D(n,2)p$: 燃料

${}^9\text{Be}(n,2n)2\alpha$: 中性子増倍材

${}^6\text{Li}(n,t)\alpha$: Tの増殖材

${}^6\text{Li}(n,nd)\alpha$: 中中性子の減速

${}^7\text{Li}(n,nt)\alpha$: Tの増殖材

${}^{12}\text{C}(n,n')3\alpha$: 第一壁材料

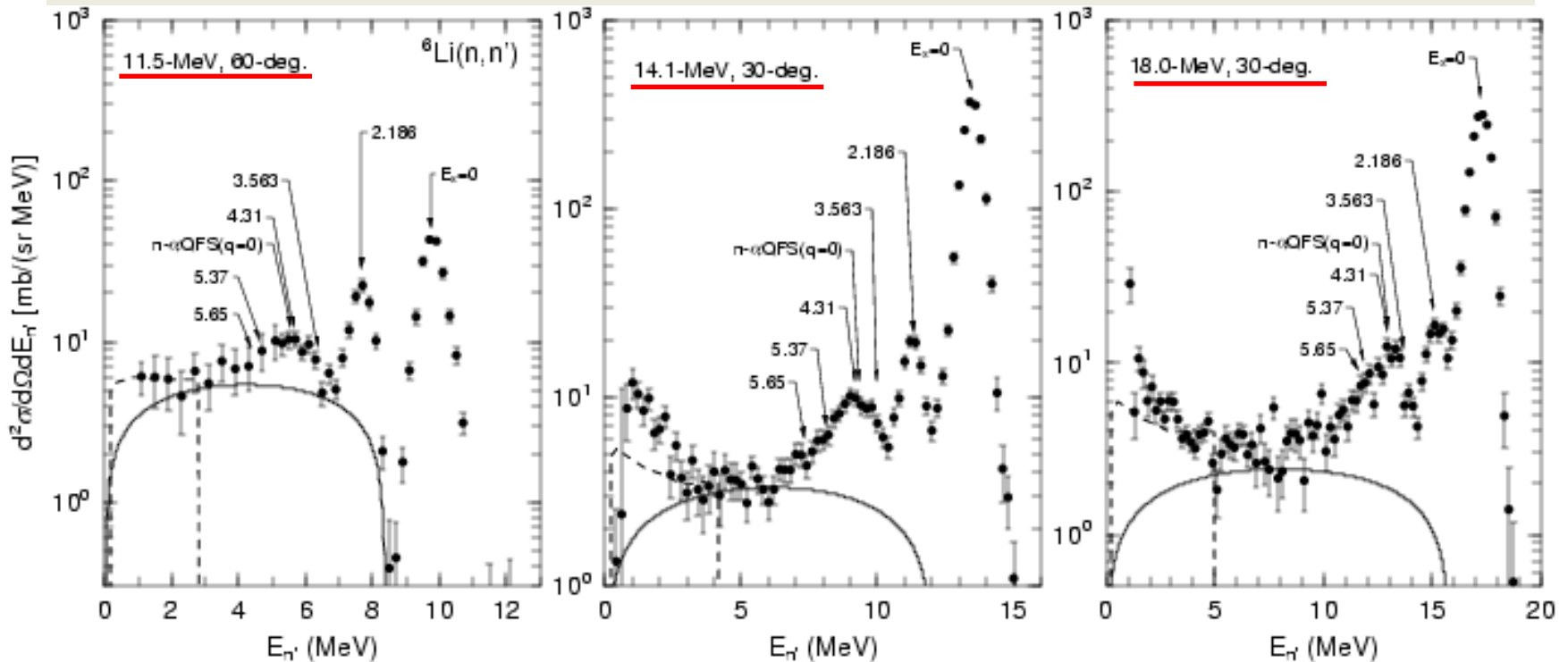
${}^7\text{Li}(d,n)$: 材料照射中性子源

.....

核融合炉は、軽い核の反応、特に三体、四体ブレークアップ反応や組み替え反応の宝庫

クラスター物理の活躍の場

${}^6\text{Li} (n, xn)$ 二重微分断面積



(n, xn) 中性子放出二重微分断面積 (S. Chiba et al., PRC58, pp.2205-2216(1998))

実線: 三体のphase-space分布

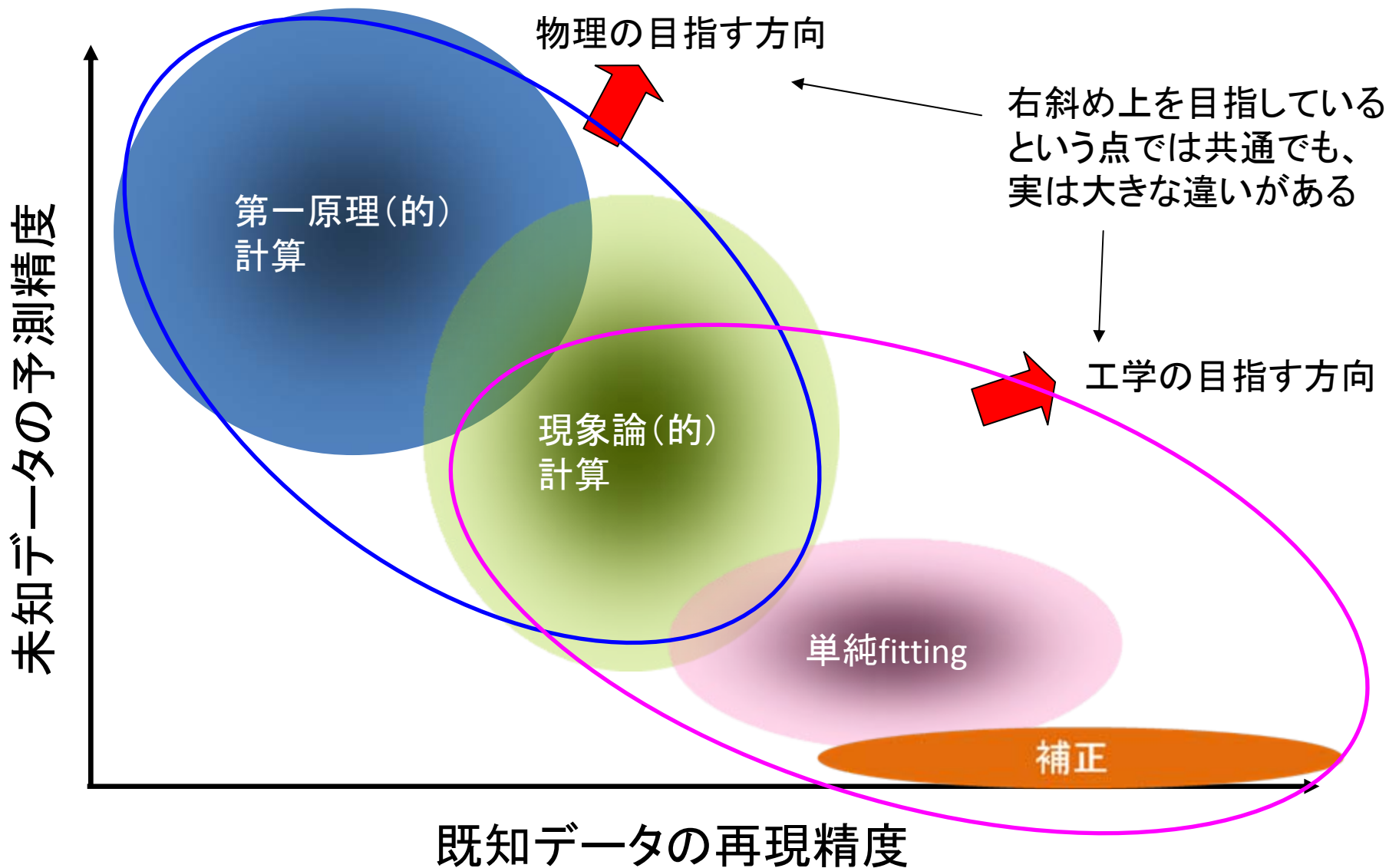
- Breakupの寄与が非常に大きい(基底状態のみが安定): ${}^6\text{Li}(n, n'd)\alpha$, $(n, 2np)\alpha$
- 全体のスペクトルは、二体、三体、四体の終状態の混合
- 工学的には、その全体を理解し、任意のエネルギーで予測することが必要
- 日本の強力なクラスター理論コミュニティは大きな貢献が可能な分野

核データに要求される精度

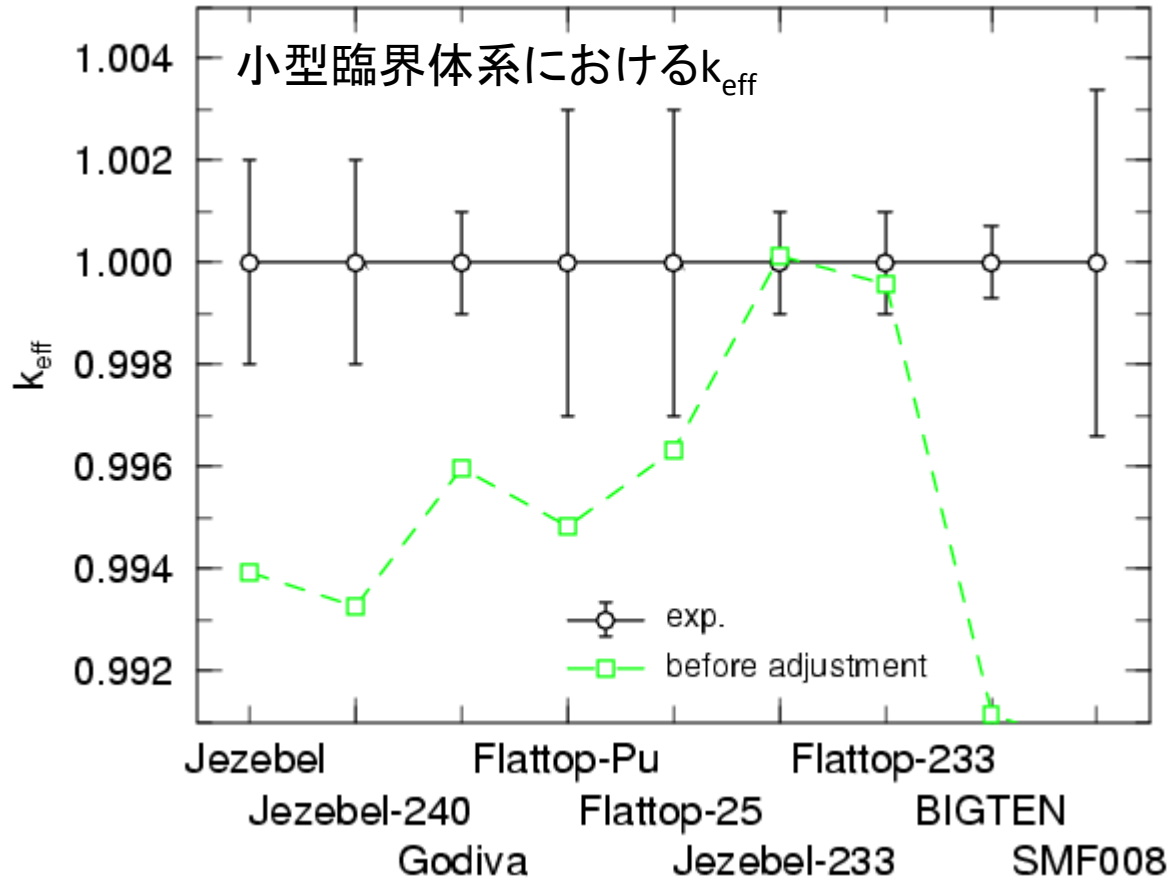
- 物理的視点
 - 原理、原則を重視
- 工学的視点
 - 利用分野から要求される精度を満たすことを重視

同じ核データを扱っていても、物理と工学を分かつ原因？

データの予測精度と再現精度

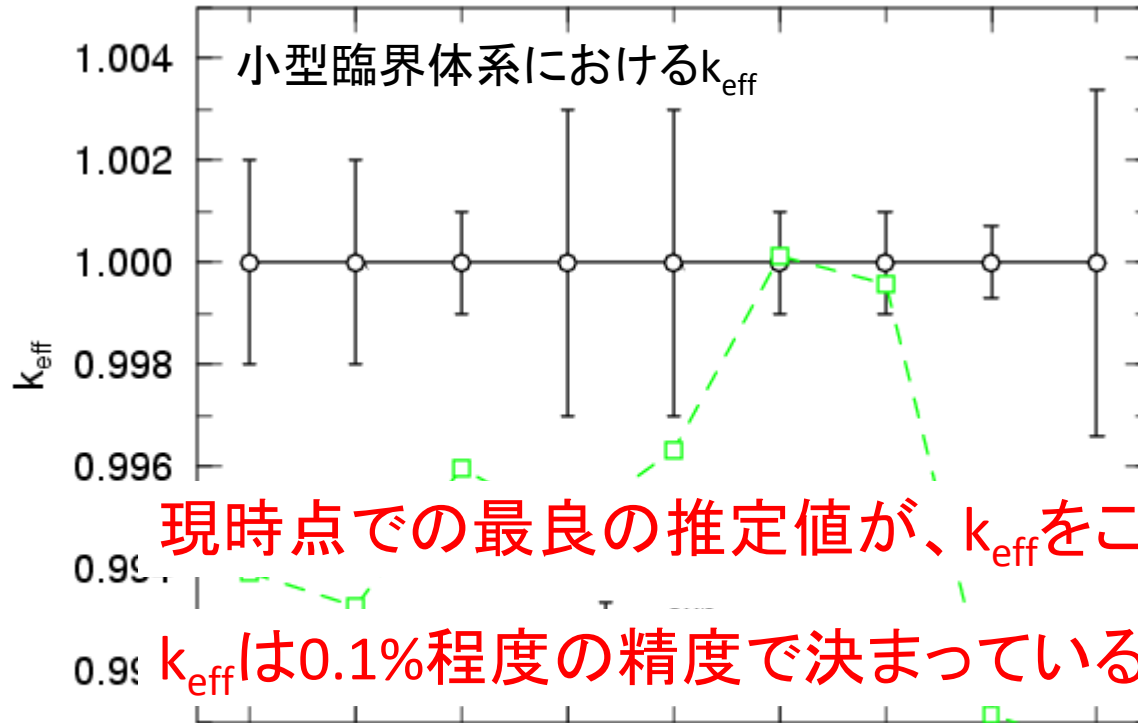


原子力で要求されるデータ精度の水準 (k_{eff})



最新の実験データと最新の統計模型、統計解析を駆使して断面積を予測し、現時点で最良と思われる核データセットを作成して、いろいろな臨界体系における実効増倍係数(k_{eff})値と比較する

原子力で要求されるデータ精度の水準 (k_{eff})



最新の実験データと最新の統計モデル、統計解析を駆使して断面積を予測し、現時点で最良と思われる核データセットを作成して、いろいろな臨界体系における実効増倍係数(k_{eff})値と比較する

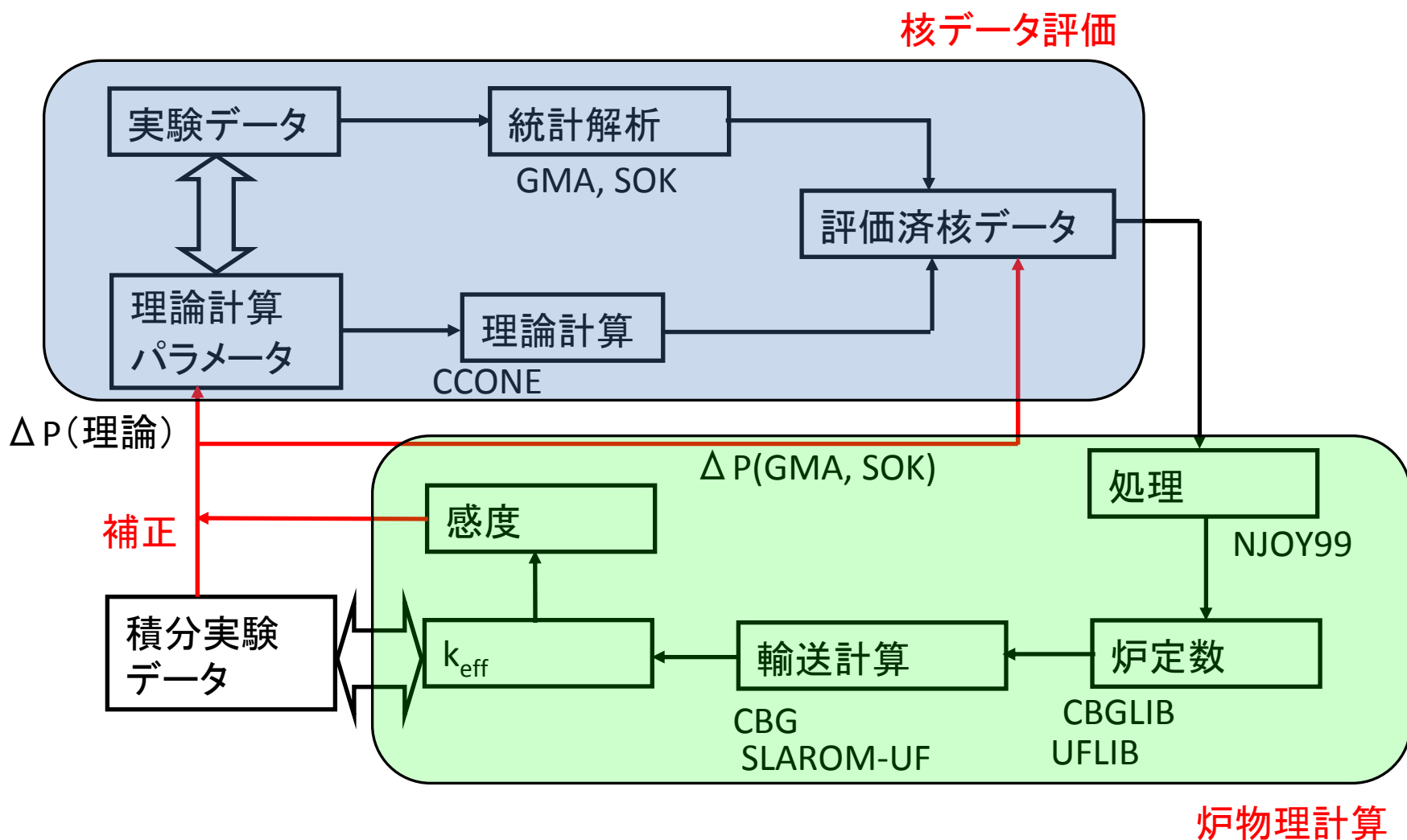
現時点での最良の推定値が、 k_{eff} をことごとく過小評価する

k_{eff} は0.1%程度の精度で決まっている

断面積を、0.1%水準の精度で予測することが可能か？

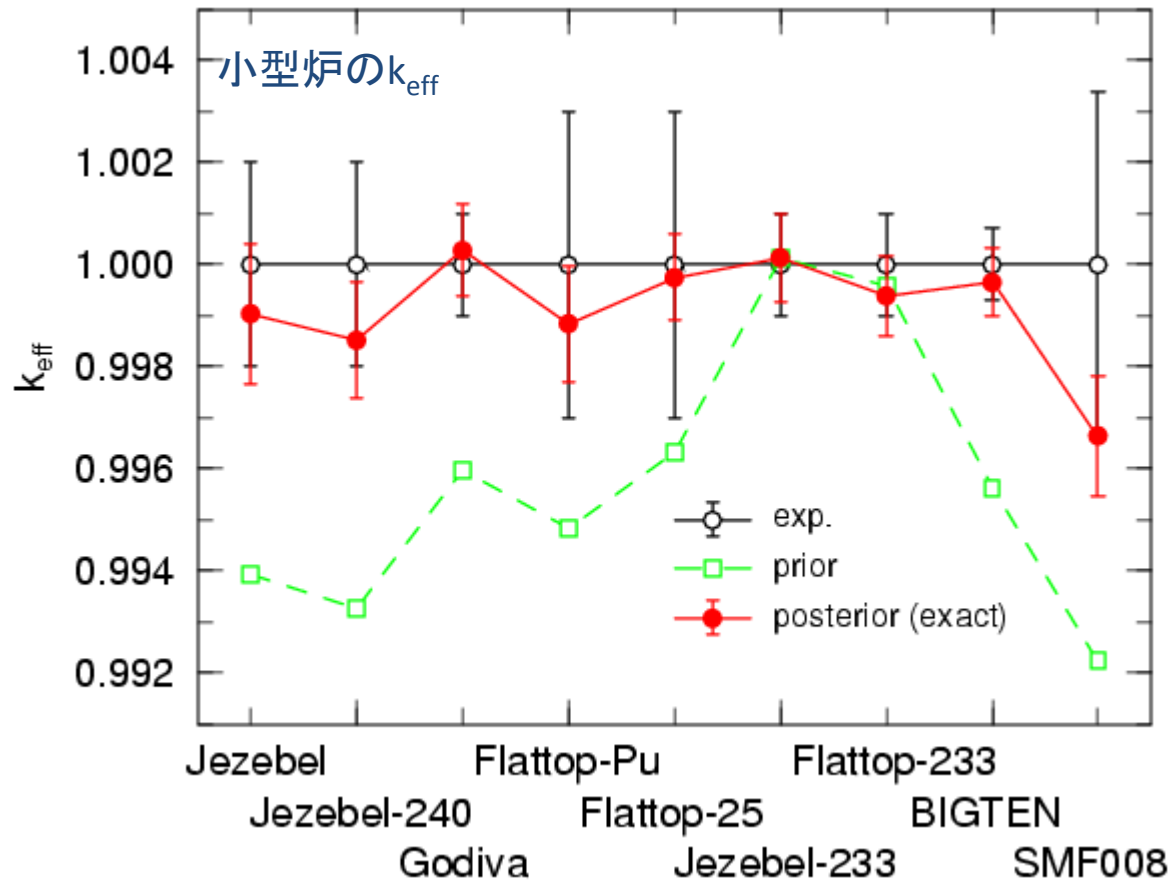
それができないならば、何らかの現象論的対策が必要: 補正

炉物理データによるパラメータの補正



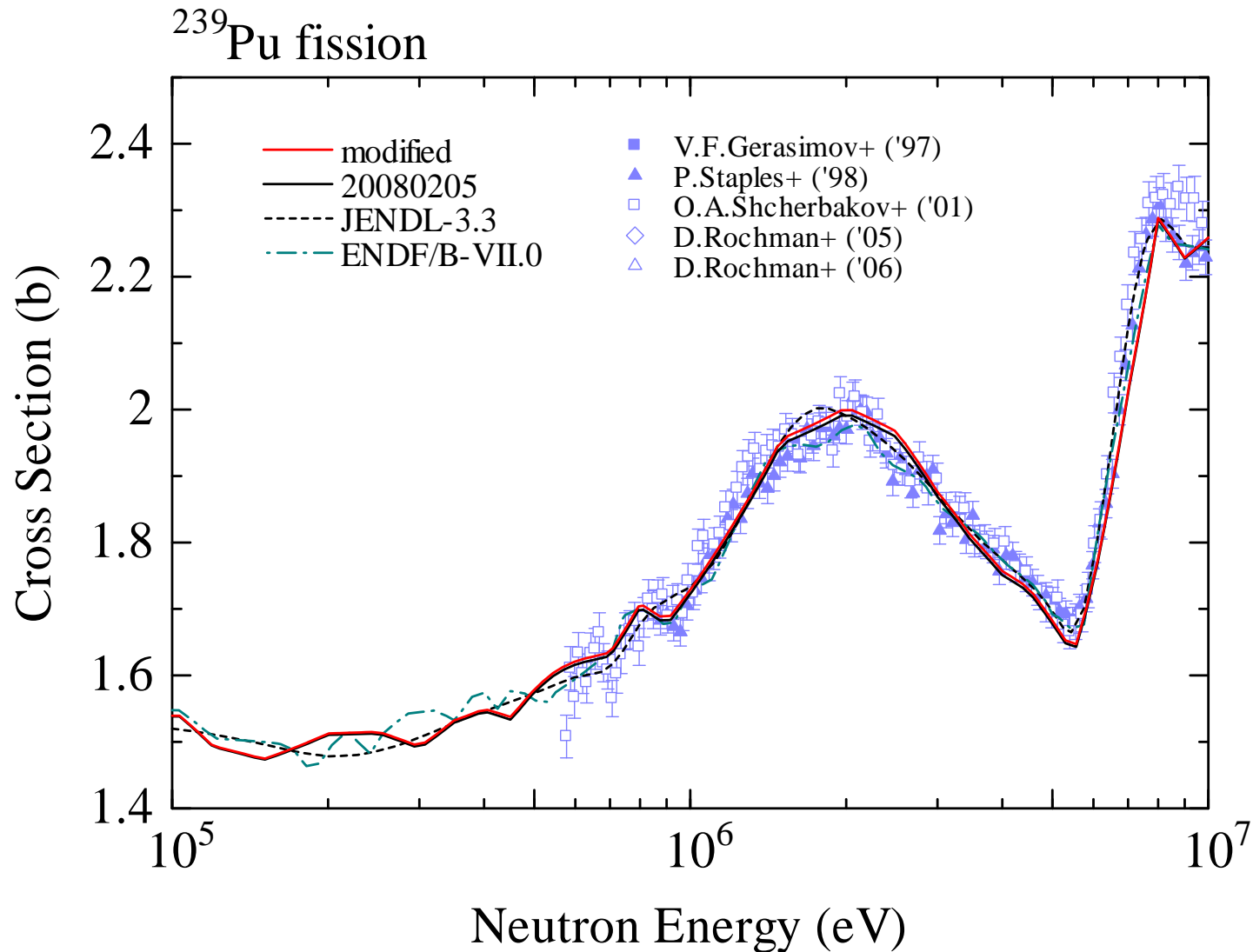
主要アクチノイド7核種に対する補正

断面積を決定する7核種の計70個のパラメータを、 k_{eff} データを再現するように補正



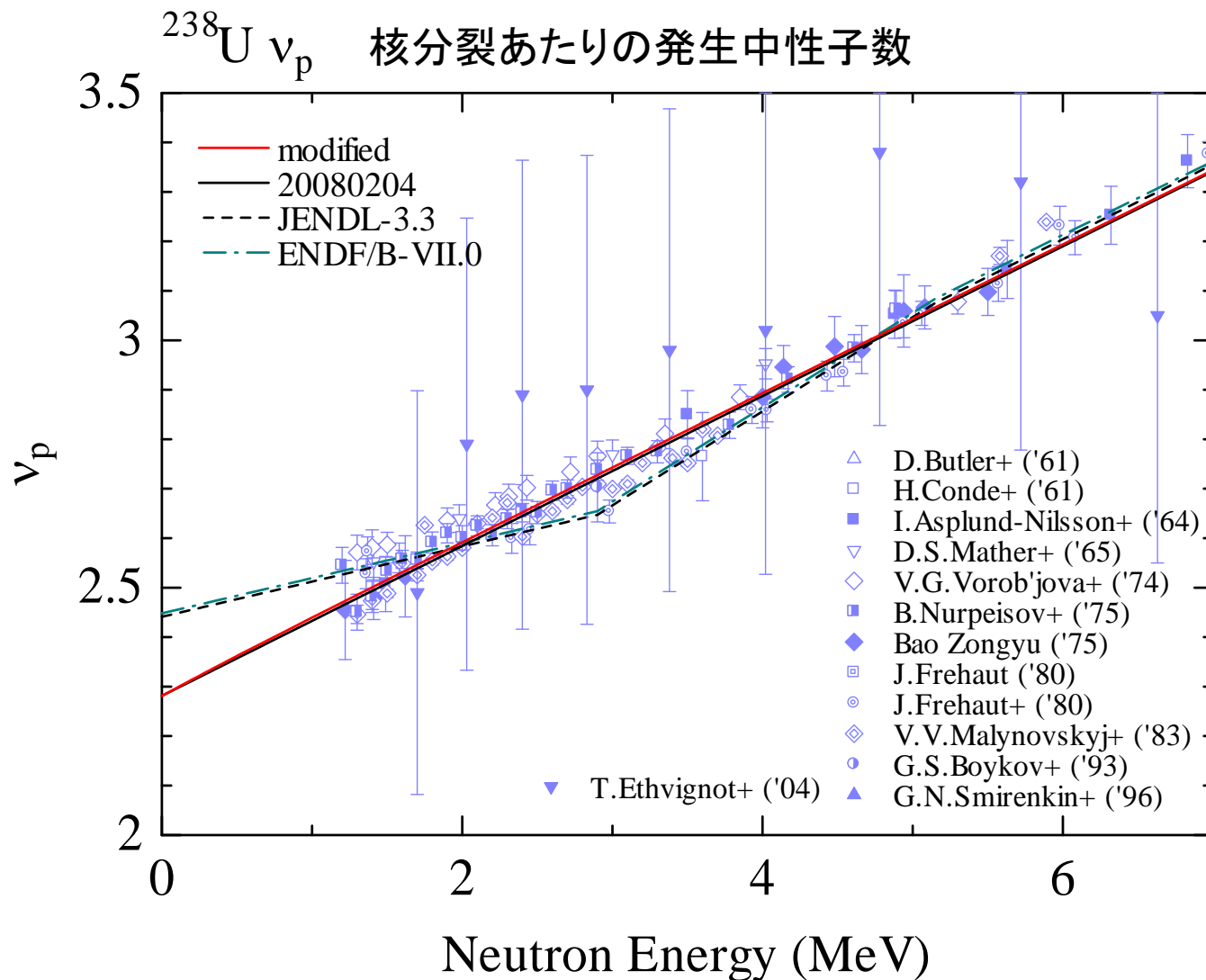
k_{eff} を再現するために必要な変化

(黒の実線から赤の実線へ)



k_{eff} を再現するために必要な変化

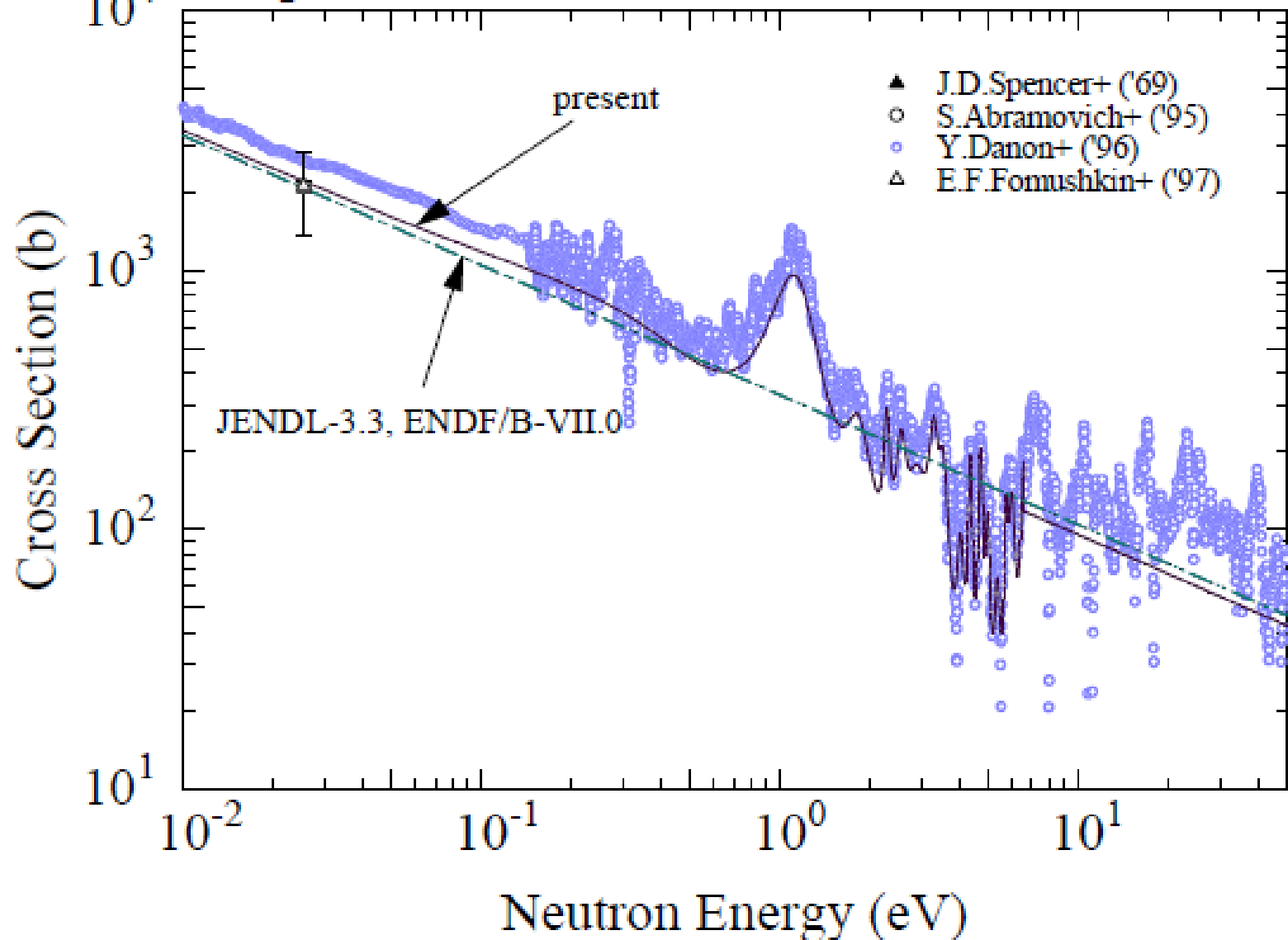
(黒の実線から赤の実線へ)



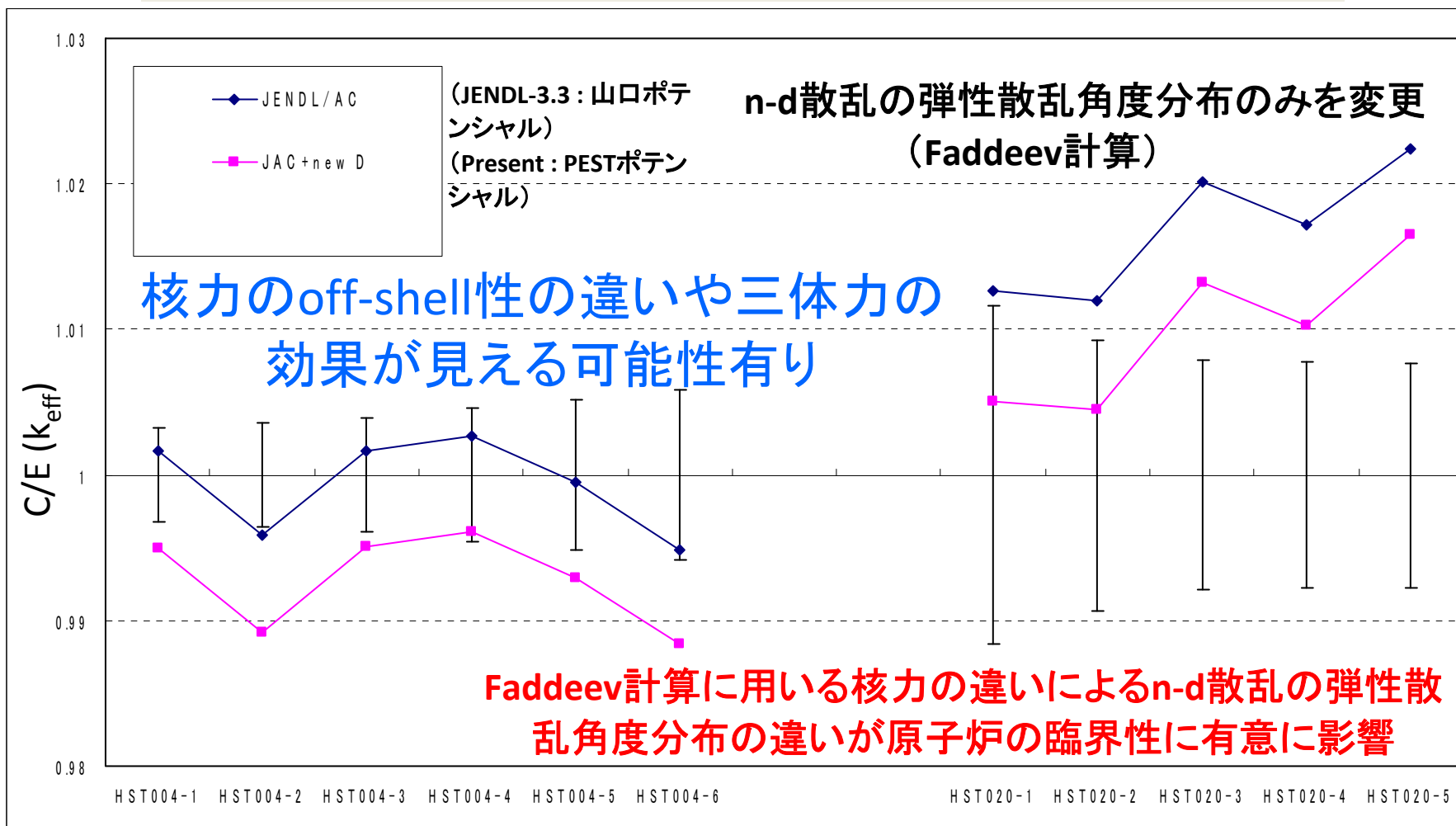
“補正”からわかること

- 主要核種の断面積は、線の幅程度(約0.5%)の違いが原子炉の臨界性に大きな影響を与える
 - 微分的実験データ、または理論計算をいかに駆使したとしても、この精度で核データを定めることは不可能
 - できることは、最良の予測値と、それがどの程度不確定であるか(誤差)という情報を与えること
 - 最終的には炉物理計算による補正が必要で、その際、上で与えた情報が初期値、初期誤差として使われる
- 臨界性に対する感度が低い核種については、要求される精度は自ずと低くなる
 - しかし、それら全体が臨界性に与える影響があまりに見当違いだと、調整自体が不可能になるか、真でない所に収束する
- 評価側と応用側の求める精度には一桁の差があるため、最良の評価を行えば応用を満足させられるというわけではない
- 補正をする場合でも、断面積を比較的少数個のパラメータで記述できる理論計算を行えることが非常に重要

^{238}Np fission



重水溶液原子炉の臨界性(実効増倍係数)

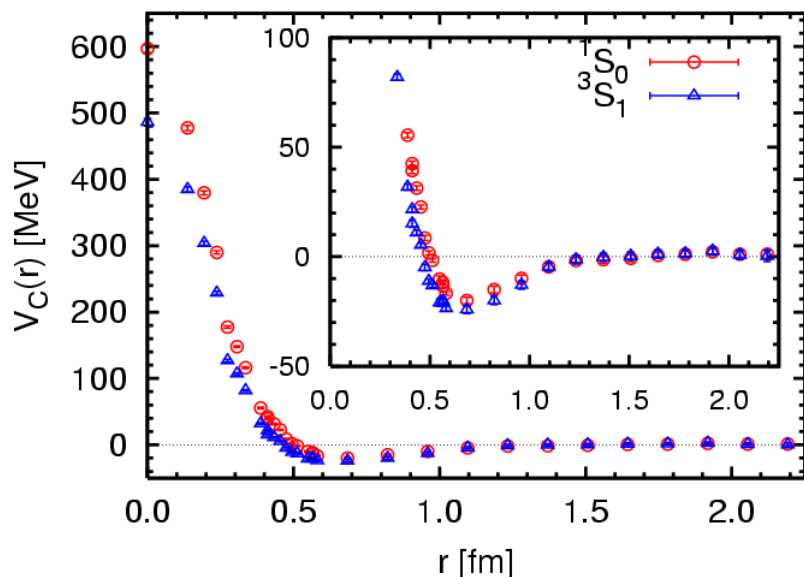


小型重水溶液燃料、重水反射対付き原子炉

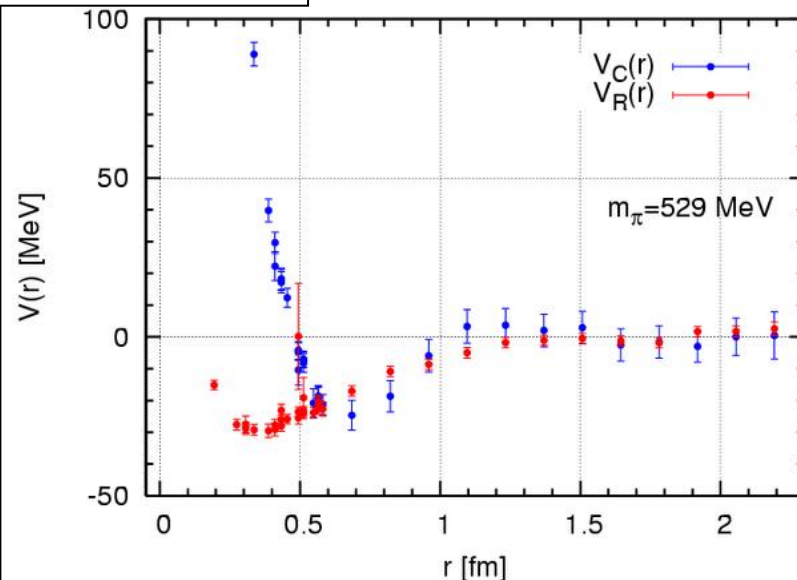
中型で裸の重水溶液燃料原子炉

石井 理修氏(つくば大)のPPTより

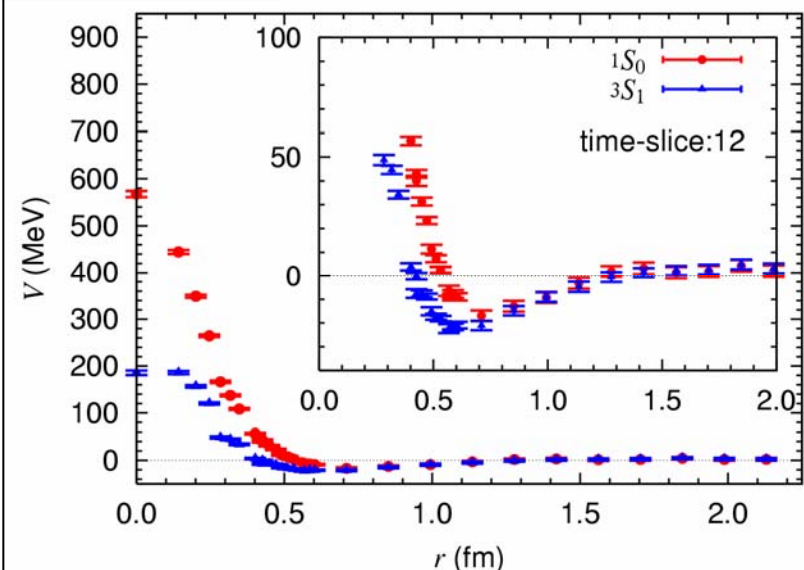
NN 中心力



NN テンソル力



N Ξ ($l=1$) 中心力



- 中心力だけでなく、テンソル力も。
- ハイペロン力も容易に求まる。
(現在、N Λ ポテンシャルが進行中)
- full QCDも進行中。

•これを使えば文句を言われたい、という核力を使い易い形で出して欲しい(原子力工学者には、非局所ポテンシャルや運動量表示のポテンシャルは使いにくい)

•精度の高い原子炉データを使って、QCDパラメータを決定できる可能性？(ジョークですが)

他国に基礎データを握られること による致命的問題点の一例

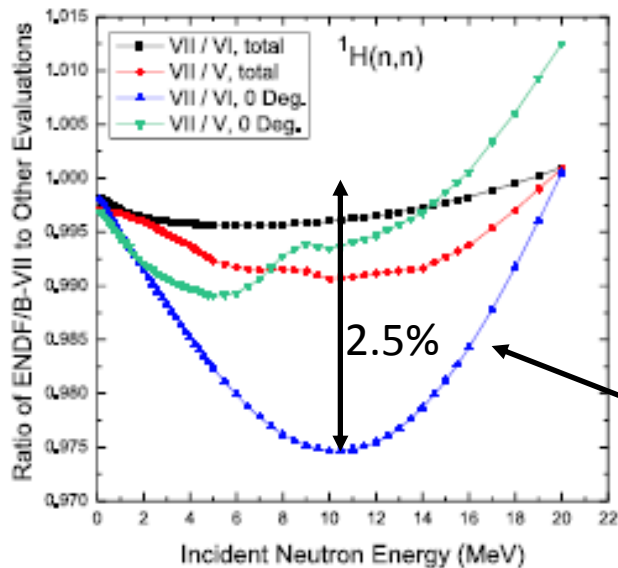


FIG. 67: The ENDF/B-VII.0 $H(n,n)$ evaluation compared with the ENDF/B-VI and ENDF/B-V evaluations. The zero degree results are ratios of the center-of-mass-system cross sections at 180 degrees (which corresponds to zero degree protons in the laboratory system).

M.B.Chadwick et al.

Nucl. Data Sheets 107,
2931(2007)より

中性子断面積の絶対測定で用いられる $H(n,n)H$ 反応の180度断面積(反跳陽子が0度方向に放出される)がENDF/B-VIからENDF/B-VIIで**最大2.5%も変化**。

18MeV以下の全領域で約0.5%以上下方に修正された:

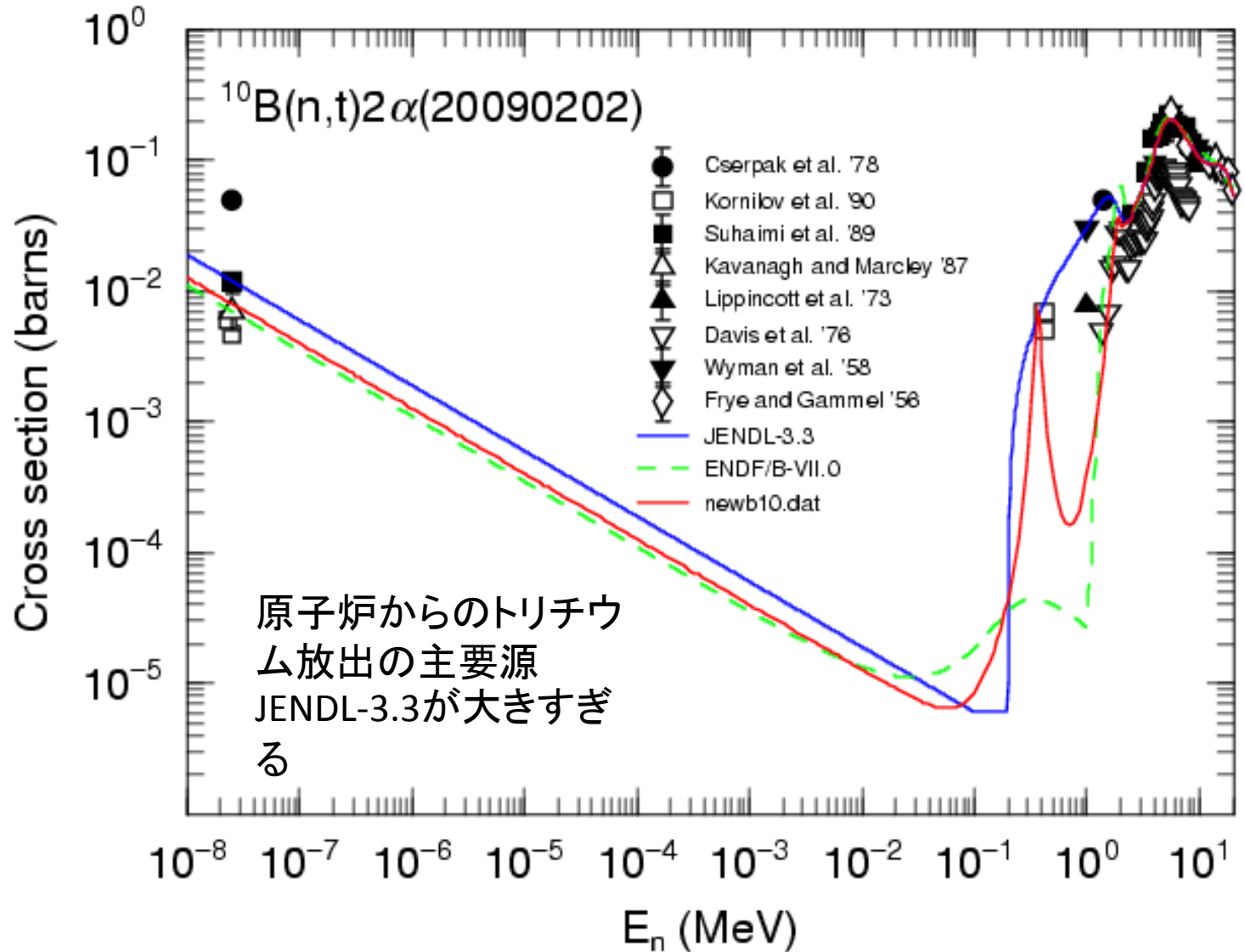
これを元にした断面積測定の結果は、全てこれだけ系統的にずれていた! ?

ベンチマークテスト、実機の k_{eff} データの(要求)精度が0.1%~0.01%であることを考えると、このようなデータに立脚する技術は砂上の楼閣→バイアス、調整の必要性

奇抜な例 : fissileの新規な生成方法

- $^{238}\text{U} + x \rightarrow ^{235}\text{U} + y$
- $^{238}\text{U} + x' \rightarrow ^{239}\text{Pu} + y'$
- $^{232}\text{Th} + x'' \rightarrow ^{233}\text{U} + y''$
- これらを、後処理(生成されたfissileの分離、核燃料への成形)を含めた全エネルギー投入量が200MeVより十分小さい値で行えて、かつ**適当にfissionableが混じっているようにできれば**、高速炉サイクル自体が不要になる可能性さえある
 - **軽水炉サイクルの確立だけでエネルギー問題が解決される**
 - 不可能だから書いてますが...
- 核不拡散(テロリストは化学分離はできても同位体濃縮まではできないだろう...)

板垣氏との協力



核データ分野における問題点

- 熱中性子散乱則(原子分子の問題)
- 主要核種のFP Yield((Z,N)分布)
 - 実験データも不十分(特にindependent yield)
 - 評価者、技術の継承の問題
- fission, 軽核についての理論の不備
 - 先進核燃料サイクル推進のネック
 - 核融合炉開発、BNCT開発等におけるクラスターの関与する反応
- 理論予測が本当に困難なのは低エネルギー(thermal, resonance領域)
 - 陽子データでの置き換えは困難
 - 新規な実験のアクティビティ、アイデアに期待
- 理研の(n, γ)データは、複合核成分を計っていますか？

まとめ

- **原子力分野に対する核物理からの貢献可能性**
 - 大いに有り
 - 核物理研究者のポテンシャルの高さ(理論、実験ともに)
 - 奇抜なアイデアの提供、または着実なやり方
 - ハドロン物理、ストレンジネス物理でさえ貢献可能
 - 理論に関して言えば、“一昔前”のコードでも応用分野では役に立ちます：
HFB, Faddeev, CDCC, CS, ... → 原子力機構にコードライブラリー作成
 - JQMD, JAM → PHITS
- **精度やアプローチの仕方に関する考え方の微妙な違いの相互理解が必要**
 - 相談していただければ、いつでも伺います
 - 逆に、物理に関するサポートを期待
- **“偉い人”と“現場の人”で意見が違うのでは？**
 - “着実なやり方”は非常に泥臭い世界である
 - すぐに成果が反映されるわけでは無い
 - それをやれば就職できますか？と聞かれますが...

原子力分野の目指している(ひとつの)姿

