

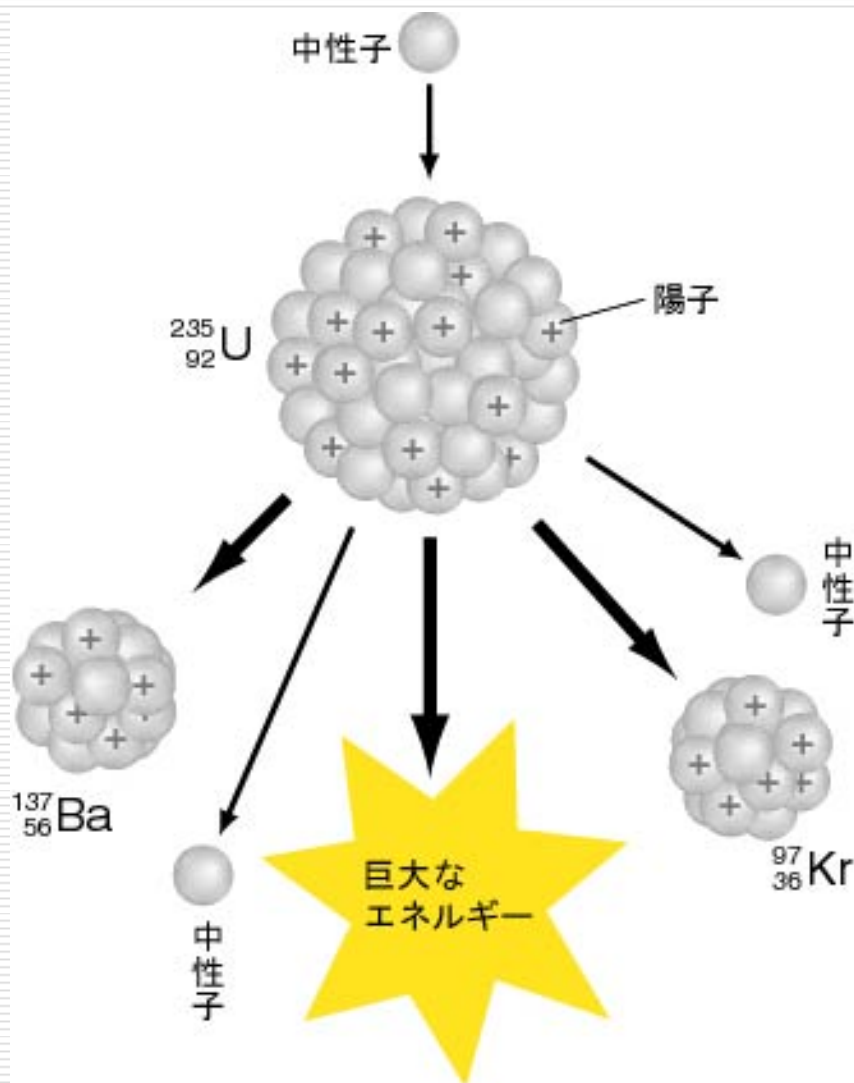
特別講義 原子科学と倫理

Dr. N. Nakae
原子力安全基盤機構 (JNES)

2013年12月26日
茨城大学大学院理工学研究科

原子力とは

- ウランやプルトニウムが核分裂する際に放出するエネルギー
- 原子力の利用方法には、
 - 電気に変換して利用
 - 原子力発電
 - 直接動力源として利用
 - 原子力潜水艦
 - 熱源として利用
 - 水素製造、暖房
 - 兵器として利用
 - 核爆弾
- 核分裂生成物、超ウラン元素を生成



核分裂の発見

- オット・ハーンとシュトラスマンはウランに中性子を当てるとバリウムが生成されることを発見（1938年12月）
- ハーンはストックホルムにいるリーゼ・マイトナーに連絡
- マイトナーとフリッシュは、この現象をウラン原子核がほぼ半分に割れたためであると結論し、生物学から細胞分裂という用語を借りてきて「核分裂」（Fission）と命名した。



化学者 ハーン



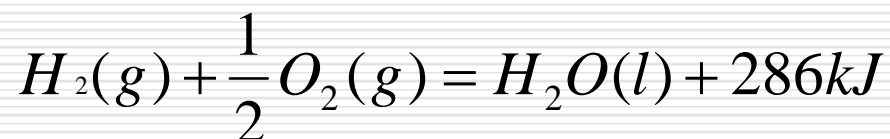
物理学者 マイトナー

原子力（核分裂エネルギー）

- 1グラムのウランが全て核分裂した場合に発生する核分裂エネルギー（原子力）

$$1MWd / gU$$

- 化学反応により発生する反応エネルギー（反応熱）



- 原子力の持つエネルギーの巨大さ（化石エネルギーの百万倍）が実感できる！

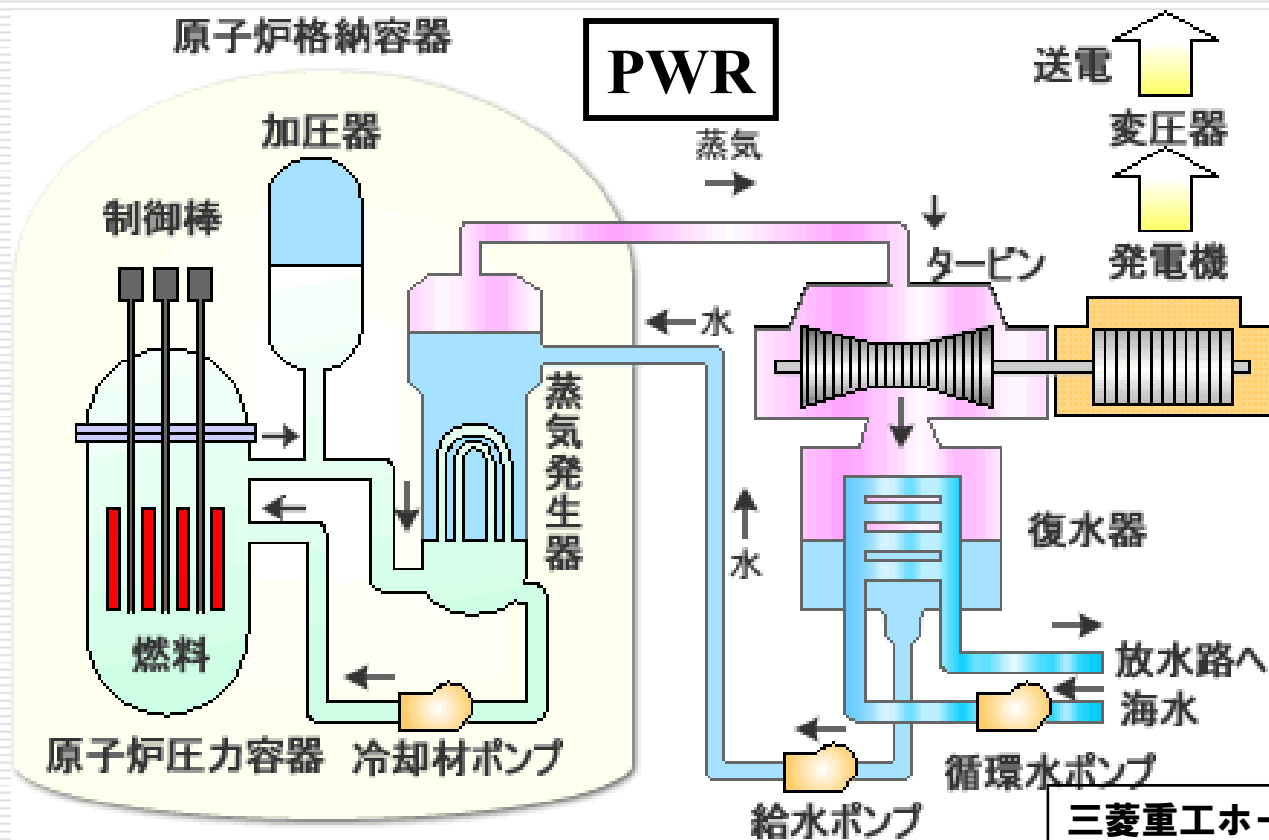
核反応	化学反応
$8.64 \times 10^7 \text{KJ/g}$	$1.43 \times 10^2 \text{KJ/g}$



1915
アインシュタイン 一般相対性理論
を発表。重力を記述する方程式を
提出。

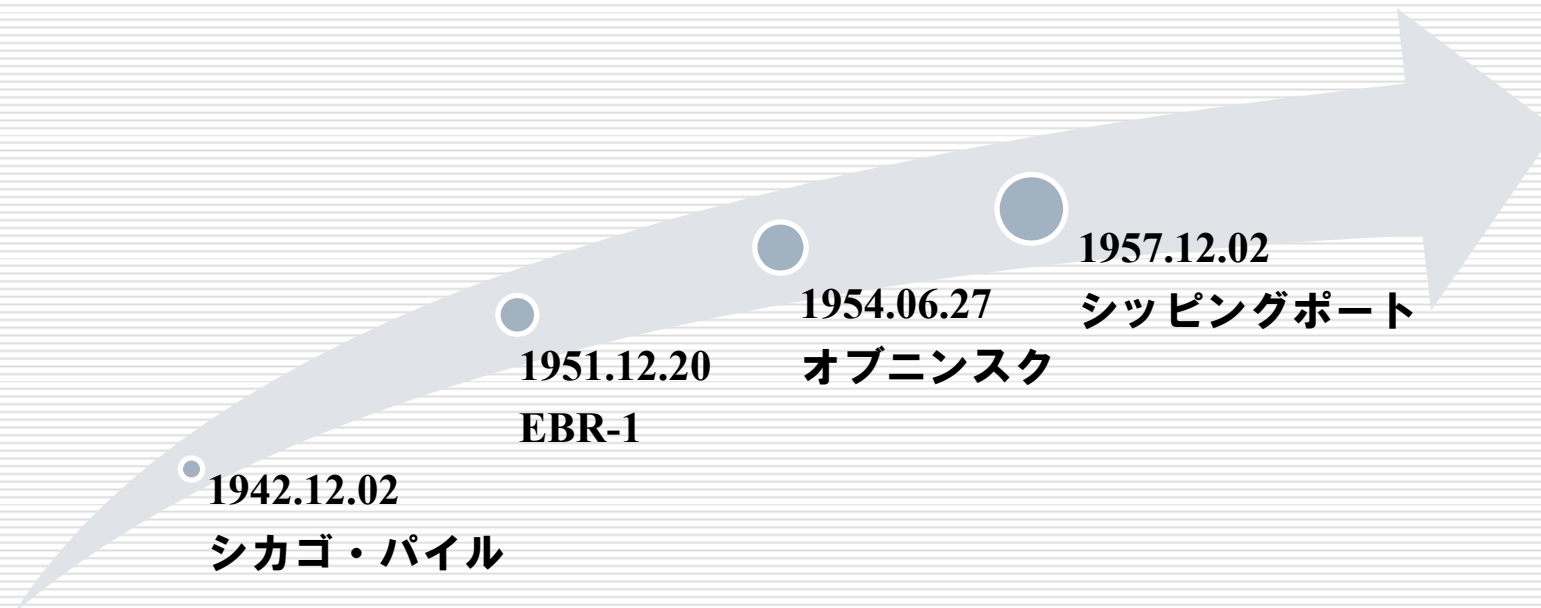
原子力発電の仕組み

- ① 核分裂による熱で蒸気をつくる。（原子炉→蒸気発生器）
- ② 蒸気でタービンを回転し発電する。（タービン発電機）
- ③ 残った蒸気は海水で冷や水にもどす。（復水器）



原子力発電の生い立ち

- 世界で最初に臨界に達した原子炉（シカゴ・パイル）
- 世界で最初に発電した原子炉（EBR-1）
- 世界最初の商業用原子力発電所
（オブニンスク原子力発電所）
（ SHIPPINGポート原子力発電所）

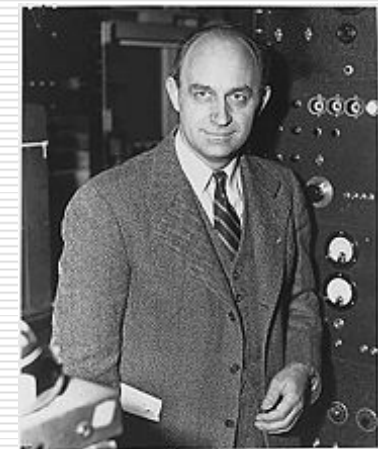


シカゴ・パイル

- シカゴ・パイル1号（Chicago Pile 1, CP-1）とは、歴史上初めて臨界に達した最初の原子炉の名称である。
- CP-1は原子爆弾材料のプルトニウム239生成用原子炉を設計するための実験炉として開発された。



初臨界の様子
1942年12月2日



シカゴ・パイルを
指揮した科学者
エンリコ・フェルミ

EBR-1

世界最初の原子力発電

米国EBR-1 (150kWe) (1951年12月20日)



EBR-1(アイダホ)



原子力により4つの電球を点灯

最初の商業用原子力発電所

世界最初の商業用原子力発電所

ソ連オブニンスク黒鉛減速軽水冷却炉（5,000kWe）（1954年6月27日）

米国 SHIPPING PORT 原子力発電所（60,000kWe）（1957年12月2日）



オブニンスク原子力発電所
モスクワ近郊



SHIPPING PORT 原子力発電所
ピッツバーグ

使用済み燃料の処理・処分

- 軽水炉（電気出力100万kWのPWR）1基の運転によって排出される使用済み燃料の数量は60年間運転するとして約4000体となる。世界全体での総発電量は約366GW（2010年時点）であるから、約1,464,000体に達する。
- ウランの可採年数は約70年であるため、約1,708,000体が排出される。
- この使用済み燃料を専用の容器に収納し超長期間保管する。（ワンスルー）
- 使用済み燃料を再処理し、U及びPuを再利用する。（リサイクル）



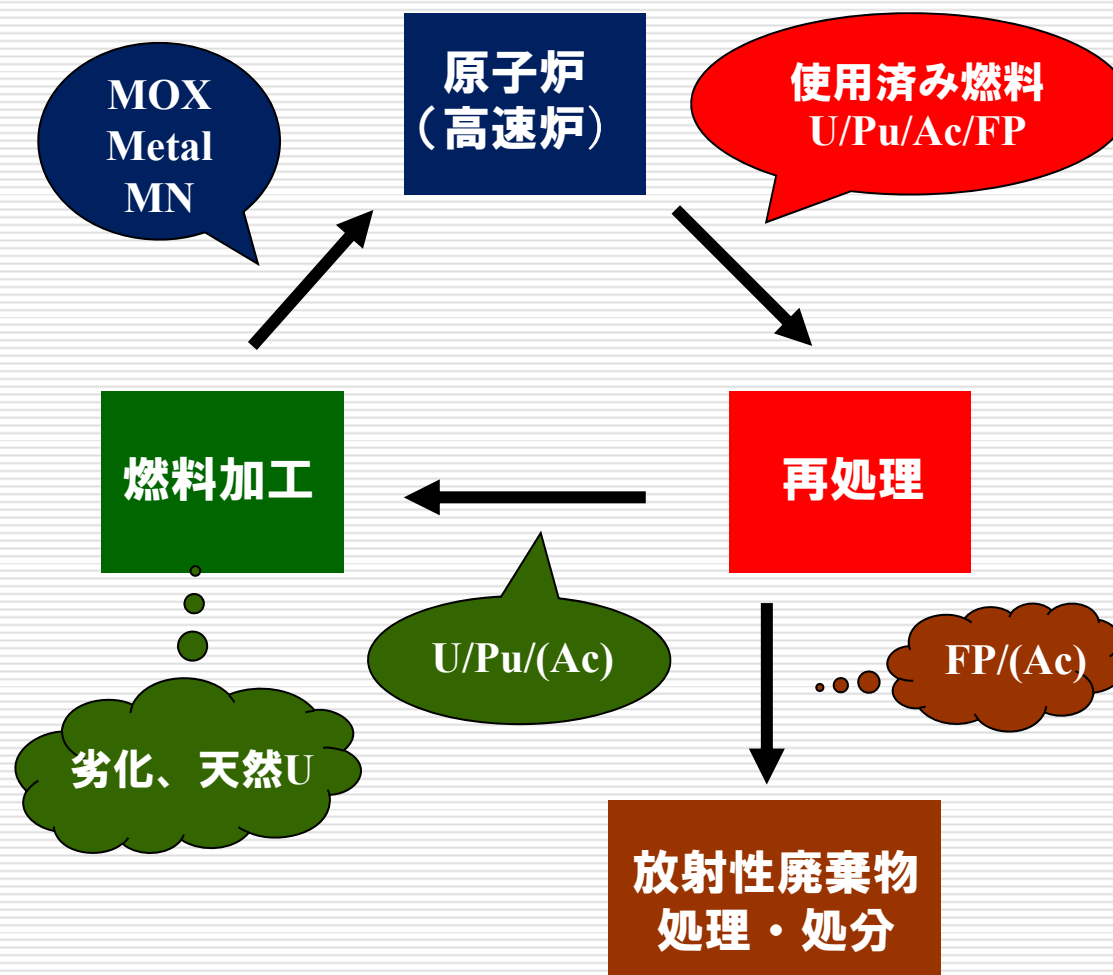
使用済み燃料プール

ワンススルーとリサイクル

- プルトニウムを含む使用済み燃料を超長期間保管・管理することに核拡散上の問題はないか？
- 保管している使用済み燃料を貯蔵場所から取り出し再処理すれば使用済み燃料は資源の一部と見做すことができる。
- 使用済み燃料を再処理し、ウラン及びプルトニウムと高レベル放射性廃棄物を分離する。
- ウラン及びプルトニウムは原子炉でリサイクルする。高レベル放射性廃棄物は深地層処分する。
- 軽水炉でのリサイクルには限界がある。（Puの高次化）
- Puの高次化はブランケット燃料の再処理により得られるPuを利用すれば防止できる。（高速炉）

高速炉及び核燃料サイクルの開発

高速炉及び核燃料サイクル



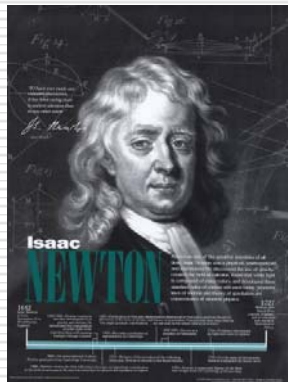
サイクルに供給する物質は劣化・天然ウラン、サイクルから排出される物質は核分裂生成物（FP）及び長半減期を持つアクチニド元素である。

原子力に必要な学問（原子科学）

- 原子炉→力学、熱力学、電磁気学
機械工学、伝熱工学、原子炉工学、核燃料工学
- 再処理→化学、電気化学
化学工学、腐食工学
- 燃料加工→焼結（セラミックス）工学
- 放射性廃棄物処理・処分→地質工学、環境工学
- 共通→地震工学

「原子力は総合科学技術」
藤家洋一東工大名誉教授（前原子力委員長）

物理学の変遷とそれを築いた人達



古典力学

プラーエ
ケプラー
ニュートン
シャルル
ジュール
ヘルムホルツ



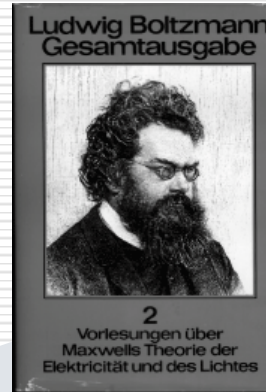
熱力学

ボイル
シャルル
ジュール
ヘルムホルツ



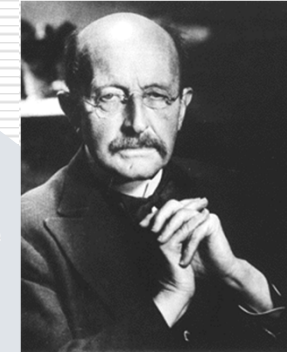
電磁気学

クーロン
アンペール
エールステッド
ファラデー
マックスウェル



統計力学

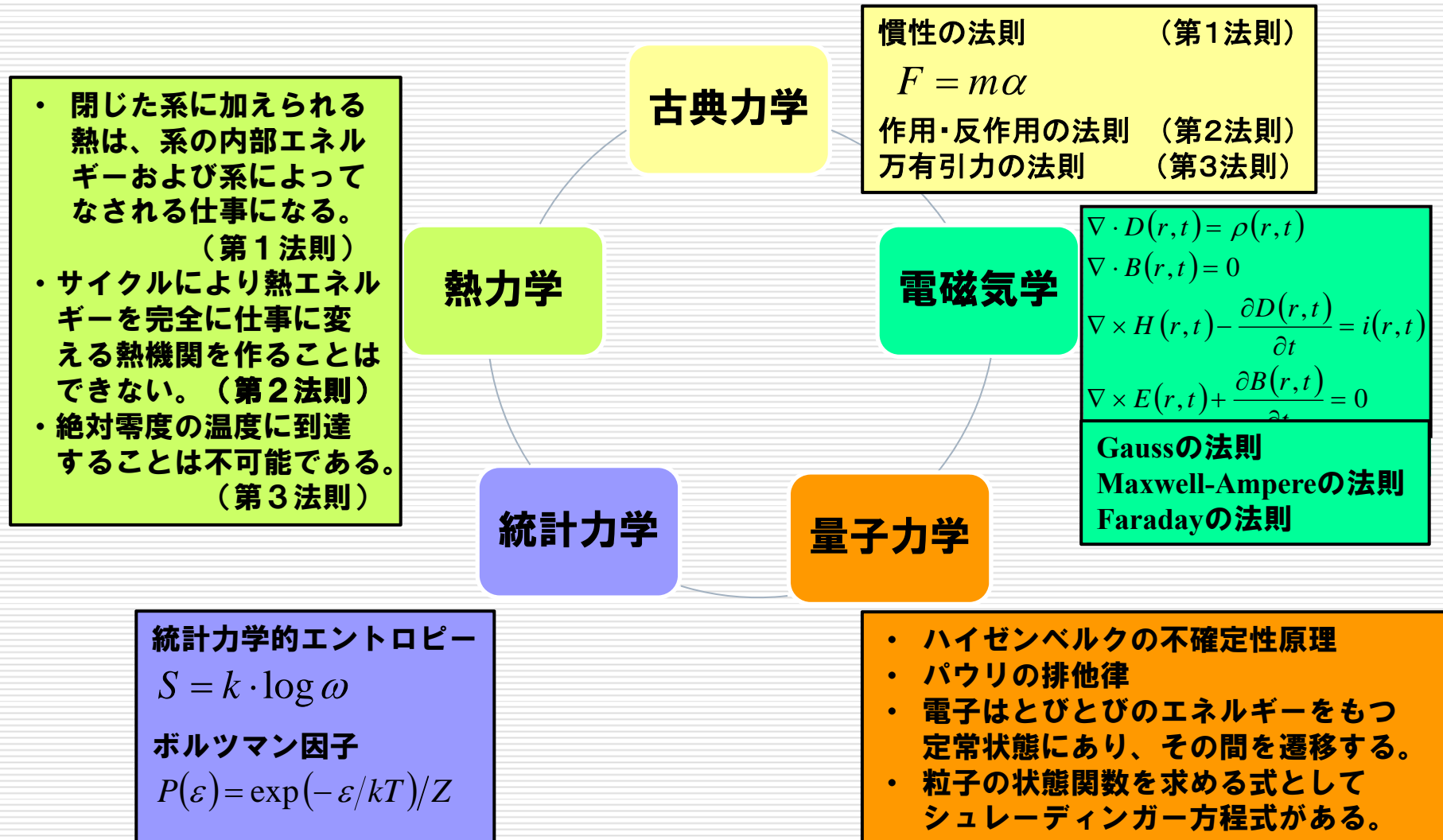
ボルツマン
ボーズ
アインシュタイン
フェルミ
ディラック



量子力学

プランク
アインシュタイン
ボーア
シュレジンガー
ハイゼンベルグ
ディラック

物理学の重要なポイント



19世紀末から20世紀前半の物理学（総括）

古典物理学（力学、電磁気学、熱力学）
対象は顕微鏡で見える範囲、現象は連続

新しい物理学（量子力学）
対象は粒子（原子）、現象は不連続

原子力学（げんしりきがく）総合科学技術
素粒子の発見、原子モデル、核分裂
（原子力は21世紀の地球を救えるか？）

核分裂生成物

- 核分裂生成物は質量数が95と140のところでピークを持つ。
- 代表的な組合せとして、
 $^{97}\text{Kr}/^{137}\text{Ba}$
 $^{93}\text{Rb}/^{143}\text{Cs}$
- 核分裂生成物は不安定なもの（不安定核）が多い。安定核に移行する過程で放射線（ γ 線）を出す。

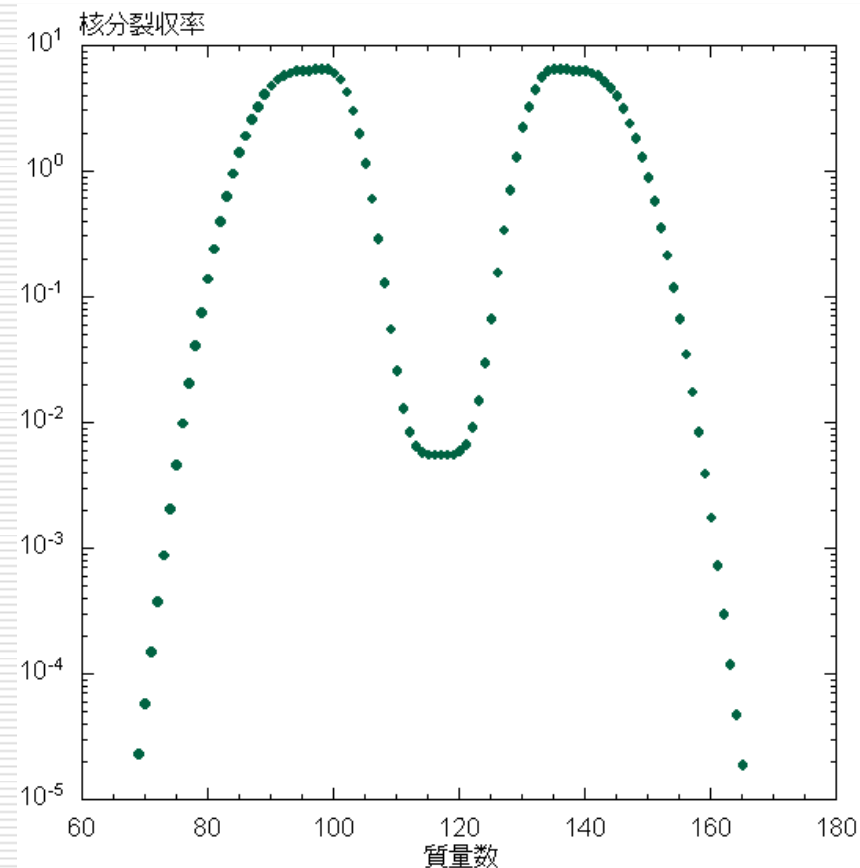
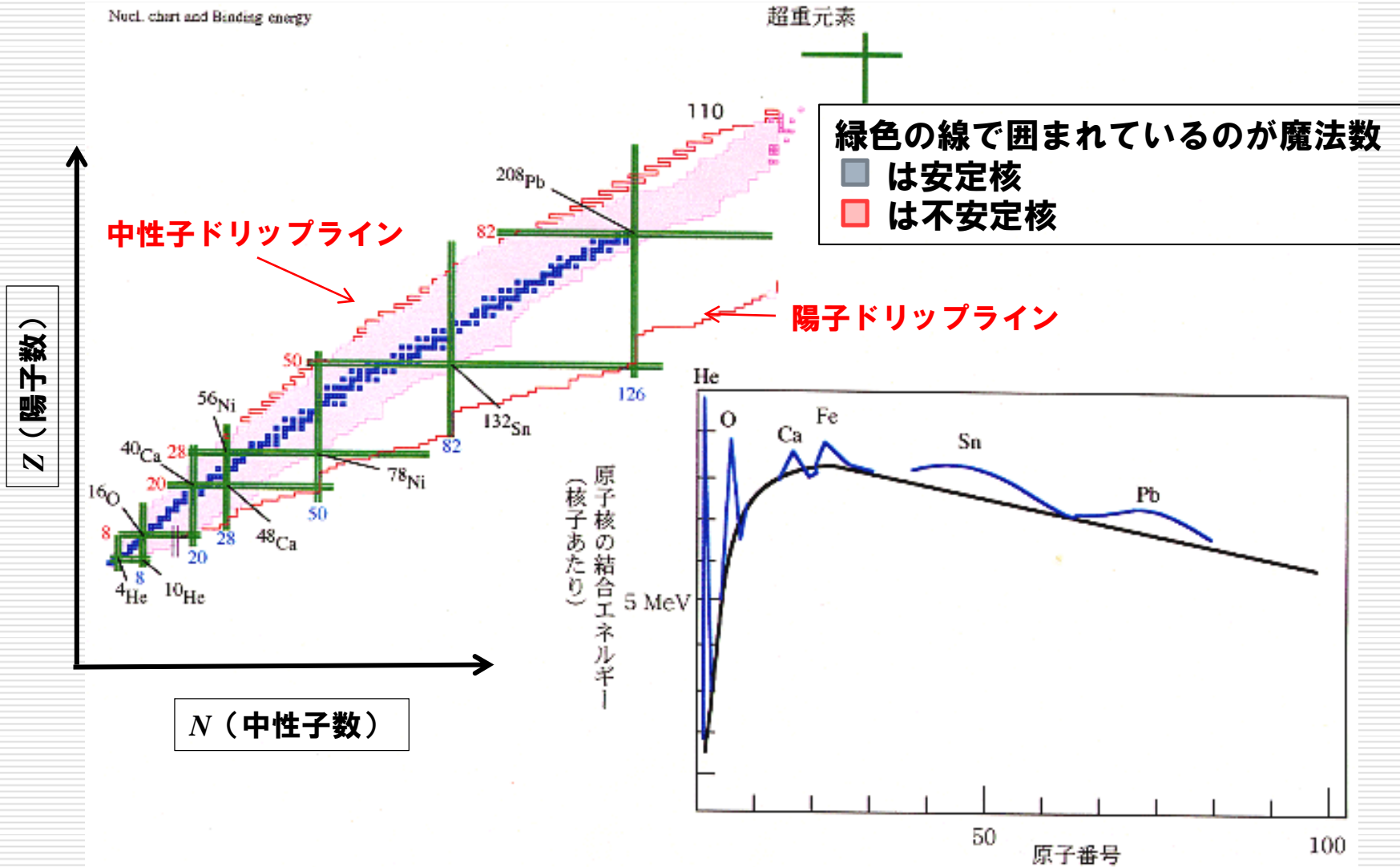


図5 核分裂生成物の収率
(ウラン235が熱中性子で核分裂を起こした場合の例)

[出典] T. Nakagawa et al. (編), "Curves and Tables of Neutron Cross Sections in JENDL-3.3, JAERI-Data/Code 2002-020 (2002)"

安定核と不安定核（魔法数）



放射線

- α 線（ヘリウムの原子核）
- β 線（電子線）
- γ 線（電磁波）
- 中性子線

α線の発見



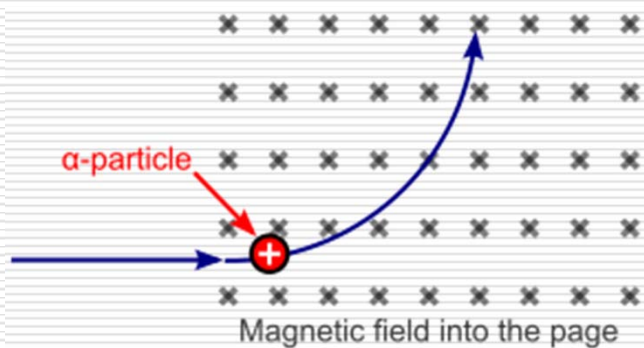
アーネスト・ラザフォード

1898年 -ウランから2種類の放射線（α線とβ線）が出ていることを発見。

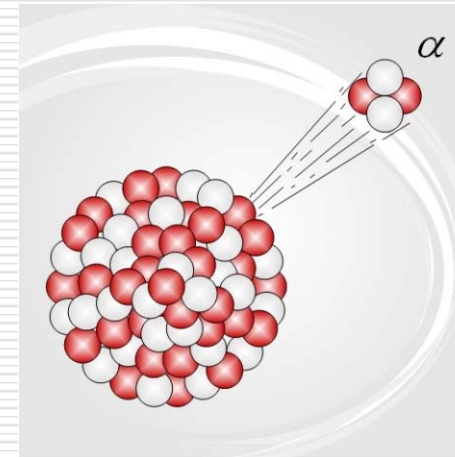
1899年 -放射線のアルミ箔の透過を調べα線とβ線を分離。

1900年 -γ線が電磁波であることを示す。放射性元素が互いに移り変わると考えるようになり、半減期の概念を作る。

1907年 -ガイガーと共同でα粒子の計数に成功。後にガイガー・ミュラー計数管として実用化される。



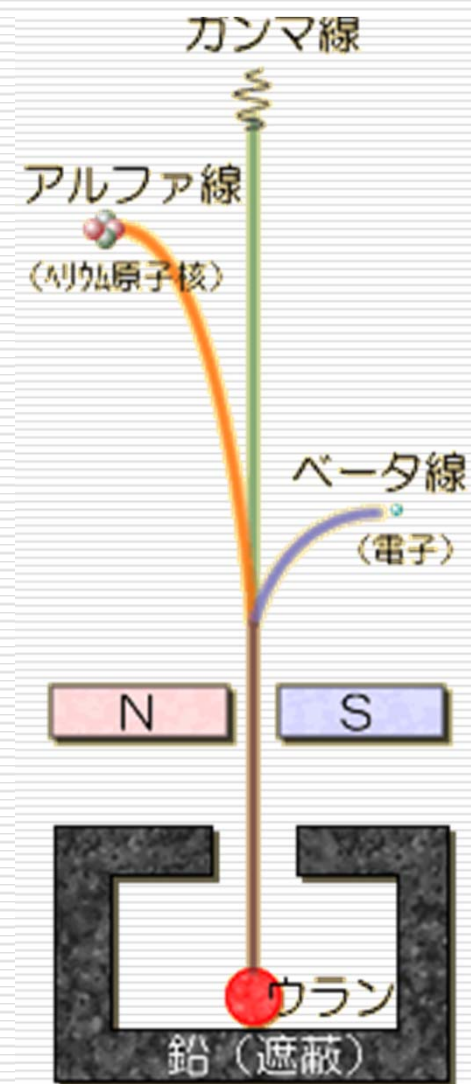
手前から奥に向かう磁場の中では、正の電荷を持つアルファ粒子は図のように回転運動する。



原子核がアルファ崩壊してアルファ粒子を放出している。

β線、γ線の発見

- 1898年、イギリスのラザフォードはウランから2種類の放射線が出ていることを発見しアルファ線とベータ線と名付けた。
- 1900年には、フランスのヴィラールがエックス線に似た透過性の強い別の放射線を見出しラザフォードによってガンマ線と名付けられた。
- これらの放射線の正体は、その後明らかにされた。
- アルファ線はヘリウム原子核、ベータ線は電子、ガンマ線は光の仲間であることが分かった。



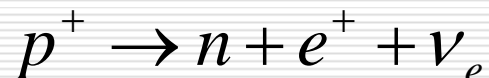
β崩壊、γ崩壊

β⁻崩壊



中性子が電子（ベータ粒子）と反電子ニュートリノを放出して陽子になる現象。単にベータ崩壊といった場合これを指す。一般的に、安定同位体よりも中性子の多い核種でβ⁻崩壊が発生する。

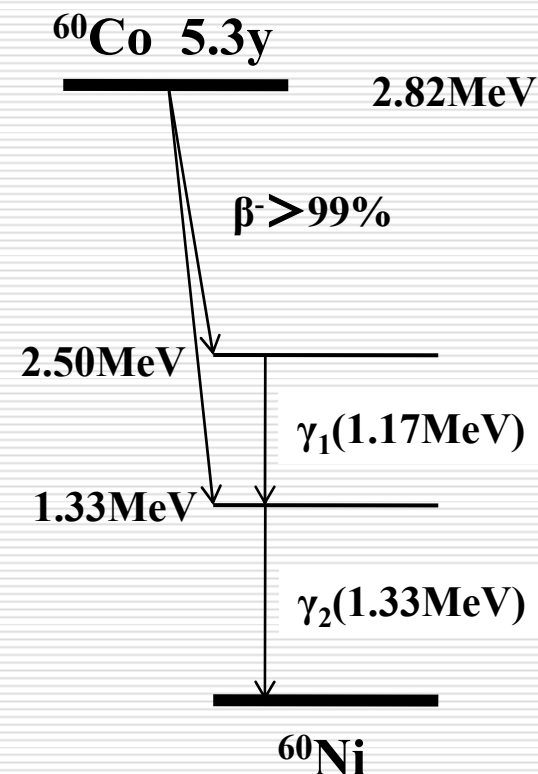
β⁺崩壊



陽子が陽電子（ベータ粒子）と電子ニュートリノを放出して中性子になる現象。陽電子崩壊とも呼ぶ。一般的に、安定同位体よりも中性子の少ない核種でβ⁺崩壊が発生する

γ崩壊

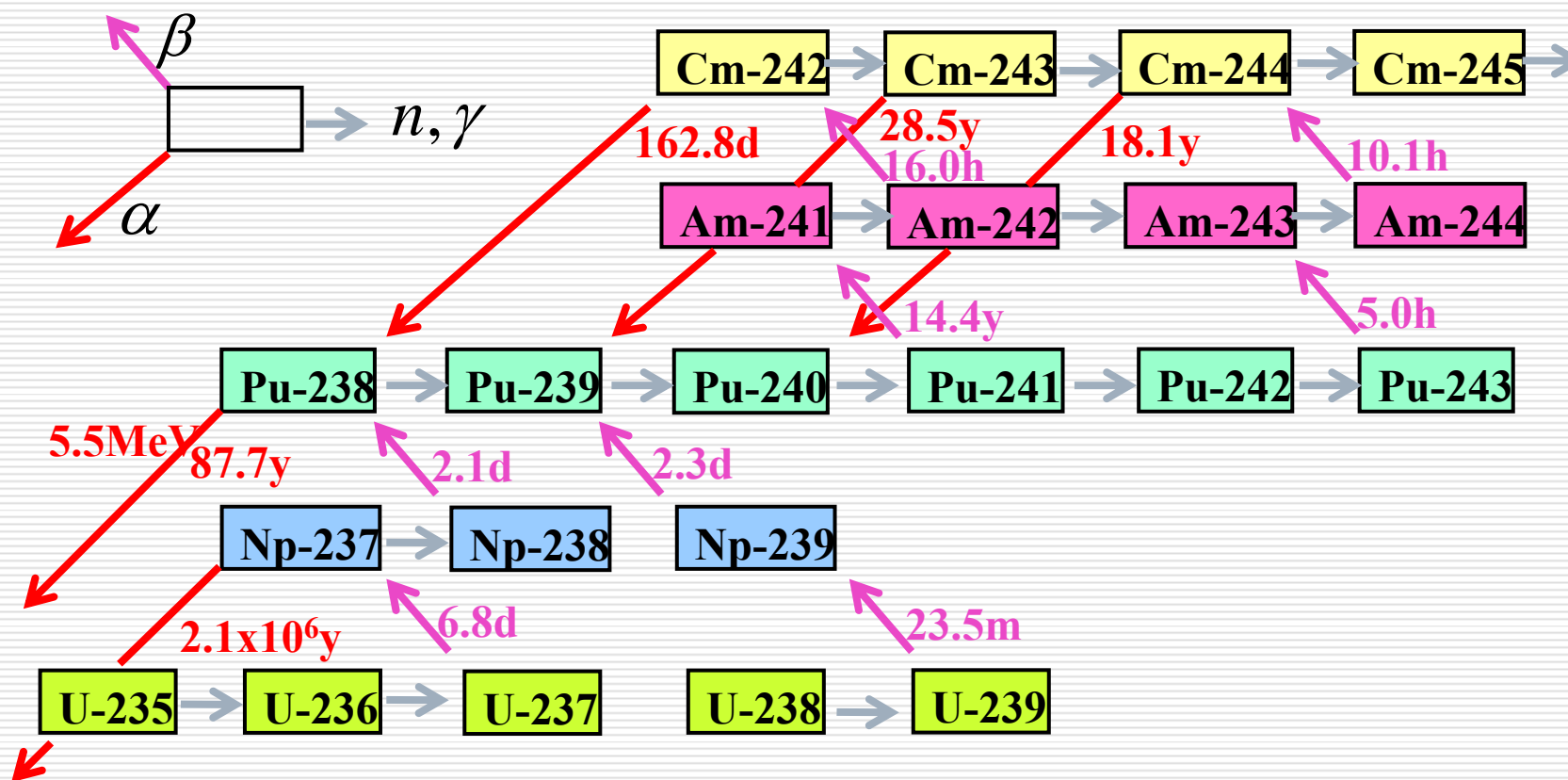
崩壊を終えた直後の原子核には過剰なエネルギーが残存するため、ガンマ線を放つことにより安定化する反応である。



⁶⁰Co の崩壊図

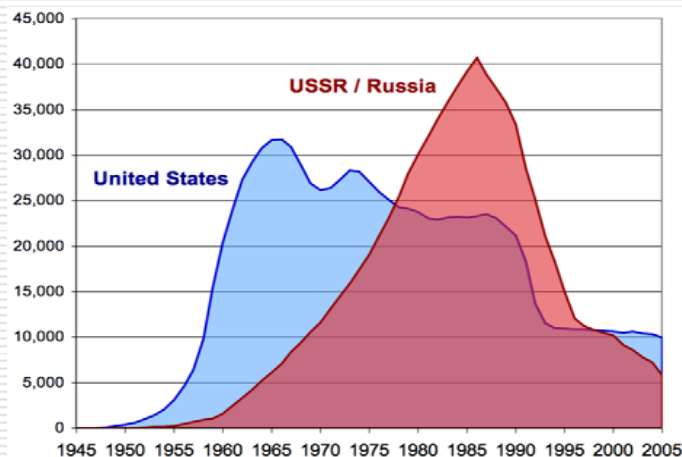
超ウラン元素

- ウランやプルトニウムの核分裂と同時に中性子捕獲により超ウラン元素を生成する。



巨大なエネルギー発生と放射能

- 原子力利用では、巨大なエネルギーを入手できるが、濃縮ウランやプルトニウムといった核兵器の材料を取扱う。
- また、核分裂生成物や超ウラン元素といった放射能を持つ副産物を生み出す。
- このため、核拡散性を高め、環境への負荷を低減するための努力を続けなければならない。
- このことは原子力倫理に繋がる。



核兵器保有量の推移



原子力平和利用への道のり

【1938年】 ウランに中性子をぶつける実験
核分裂の発見（オット・ハーン）

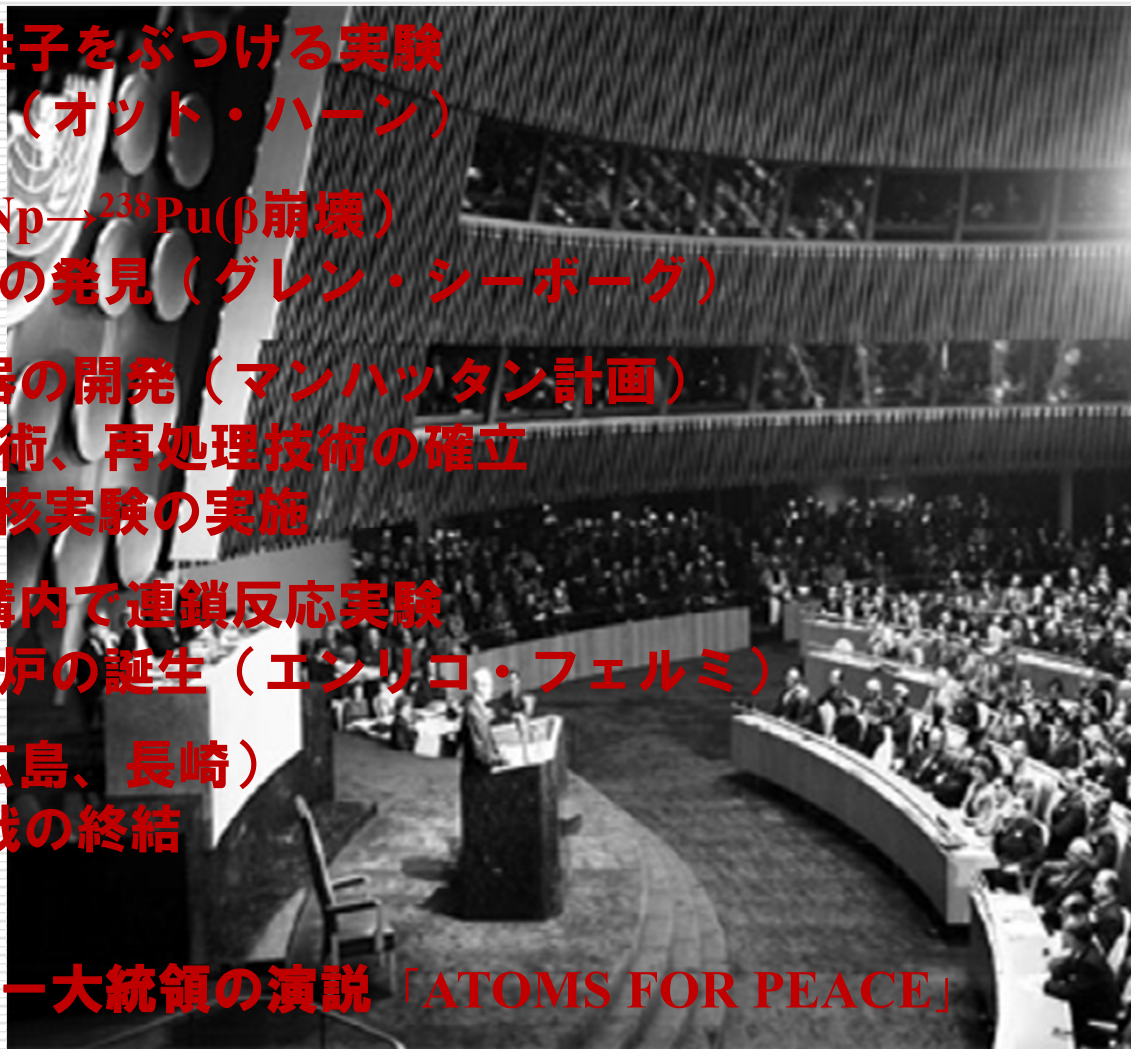
【1940年】 $^{238}\text{U}(d,2n)^{238}\text{Np} \rightarrow ^{238}\text{Pu}(\beta\text{崩壊})$
プルトニウムの発見（グレン・シーボーグ）

【1942～1945年】 核兵器の開発（マンハッタン計画）
ウラン濃縮技術、再処理技術の確立
原爆の製造、核実験の実施

【1942年】 シカゴ大学構内で連鎖反応実験
世界初の原子炉の誕生（エンリコ・フェルミ）

【1945年】 原爆投下（広島、長崎）
第2次世界大戦の終結

【1953年】 国連総会
アイゼンハワー大統領の演説「ATOMS FOR PEACE」



原子力倫理

倫理：人として守るべき道、道徳（広辞苑）

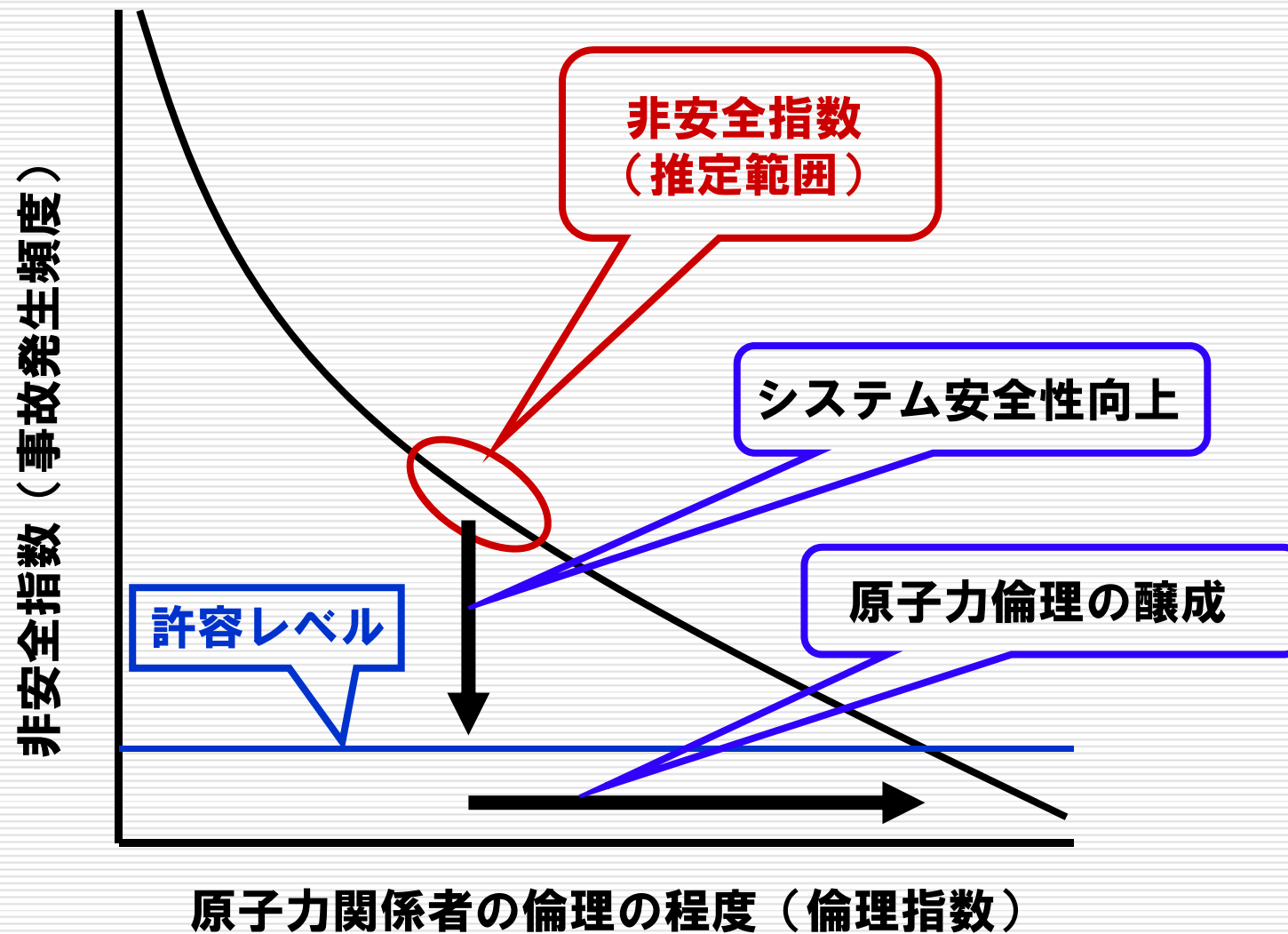
倫理：Science of Conduct（行動の科学）（英語の辞書）

日本原子力学会倫理規定憲章

1. 会員は原子力の**平和利用**に徹し、人類の直面する諸課題の解決に努める。
2. 会員は、**公衆の安全**を全てに優先させてその職務を遂行し、自らの行動を通じて**社会の信頼**を得るよう努力する。
3. 会員は、自らの専門能力の向上に図り、あわせて関係者の専門能力も向上するように努める。
4. 会員は、自らの能力の把握に努め、その能力を超えた業務を行うことに起因して社会に重大な危害を及ぼすことがないよう行動する。
5. 会員は、自らの有する情報の正しさを確認するよう心掛け、**公開**を旨とし説明責任を果たし、**社会的信頼性**を得るよう努める。
6. 会員は、**事実**を尊重し、公平・公正な態度で自ら判断を下す。
7. 会員は、あらゆる法や社会の規範に抵触しない範囲で、みずからの業務に係る契約を尊重して**誠実**に行動する。
8. 会員は、原子力業務に従事することに誇りを持ち、その業務の社会的な評価を高めるよう努力する。

原子力技術は人類に著しい利益をもたらすだけでなく、大きな災禍をも招く可能性がある。このため、原子力倫理は不可欠である。

非安全指数と倫理指数との相関



原子力倫理の醸成

- どうすれば現状より優れた行動が取れるのかを論理的、合理的に検討する能力を伸すこと。
- 危機管理、品質保証、ヒューマンエラー、リスク管理等といったすでに行われている取り組み・研修と共通すると思われるので、これらに積極的に参加すること。
- 倫理の活動には「浮世」のものである以上、「優れている」はあっても「完全である」はない、終わりのない旅だという認識が必要である。

大場恭子、原子力学会誌、「倫理つれづれ」より引用

原子力を正しく理解できているか？

- 原子力（ATOMIC ENERGY または NUCLEAR ENERGY）とは、核反応（核分裂と核融合）によって発生する熱（エネルギー）のことである。
- 原子力は、軍事利用（核兵器）および平和利用（原子力発電等）が可能である。どのように利用するかは倫理の問題である。
- 原子力は核兵器として軍事利用されるため悪であるとする考え方はどうだろうか。本当の悪は戦争である。
- 原子力は再生可能エネルギーと同様に、地球温暖化ガスを放出しないエネルギー源であるとともに、再生可能エネルギーシステムにはない優れた集中型大容量エネルギー源である。その特徴から、世界の持続的発展を支える必要な技術基盤となり得る。

原子力を正しく理解できているか？

- 原子力は膨大なエネルギーと同時に強い放射線を出すという固有の特性を有している。これが、軍事、平和利用に制約を与えている。
- 放射線を閉じ込めた上で膨大なエネルギーを利用するシステムが原子力システムであり、人間の英知により可能となった。それは、「科学と技術」によって支えられている。
- 原子力システムを進めることは、科学・技術を発展させると共に正しい倫理を持つことである。