平成30年3月17日
公開シンポジウム

偶奇分離

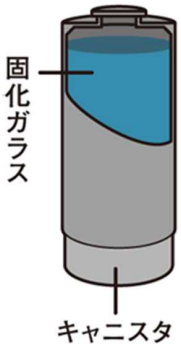
ー原発のゴミから資源を高効率で分別するー

国立研究開発法人理化学研究所
光量子工学研究領域 (RAP)　領域長
緑川　克美

増え続ける高レベル放射性廃棄物 (HLW)

原子力発電を継続する・しないに関わらず、現在までに使用済み核燃料から作成された高レベル放射性廃棄物のガラス固化体（約25000本）に対して、その安全かつ継続的な管理には莫大な経費が必要である。

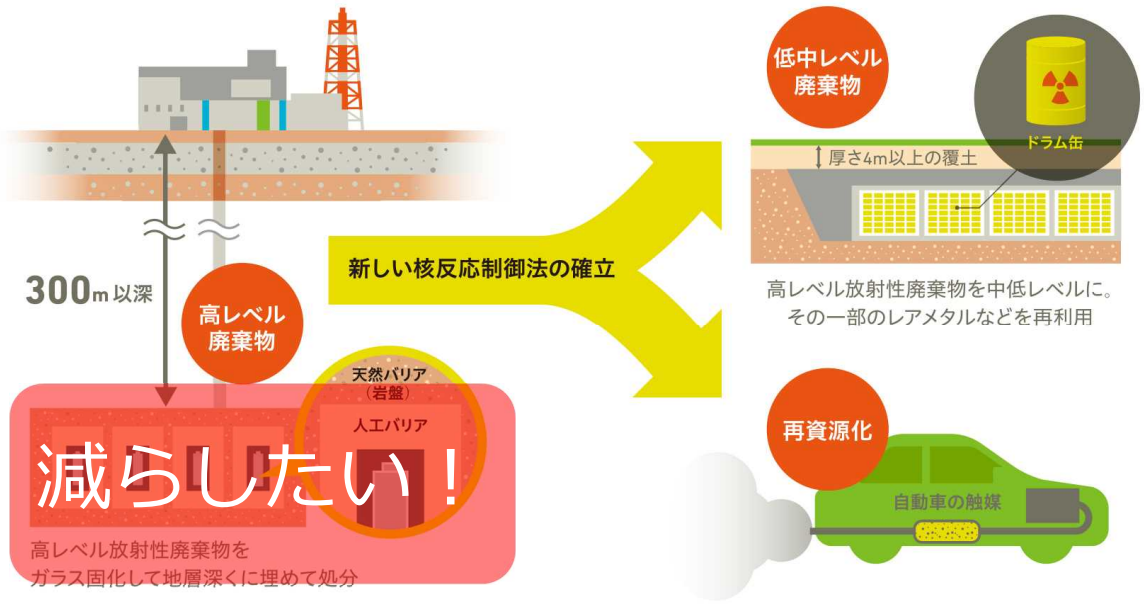
高レベル放射性廃棄物
（ガラス固化体）



放射能の高い廃液をガラス原料と融かし合わせてステンレス製容器（キャニスタ）の中で固めます。

寸　法：直径／約40cm
　　高さ／約1.3m
総重量：約500kg

参考URL:　http://www.enecho.meti.go.jp/category/electricity_and_gas/nuclear/rw/（資源エネルギー庁）

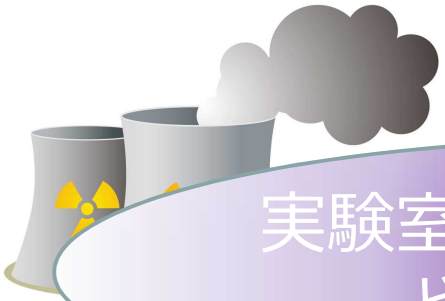


本研究は、総合科学技術・イノベーション会議が主導する 革新的研究開発推進プログラム（ImPACT）の一環として実施したものです。

核廃棄物の資源化

出力100万キロワットの原子力発電所１基から、
年間20トンの使用済み核燃料が発生する

(1 トン = 1000 kg)



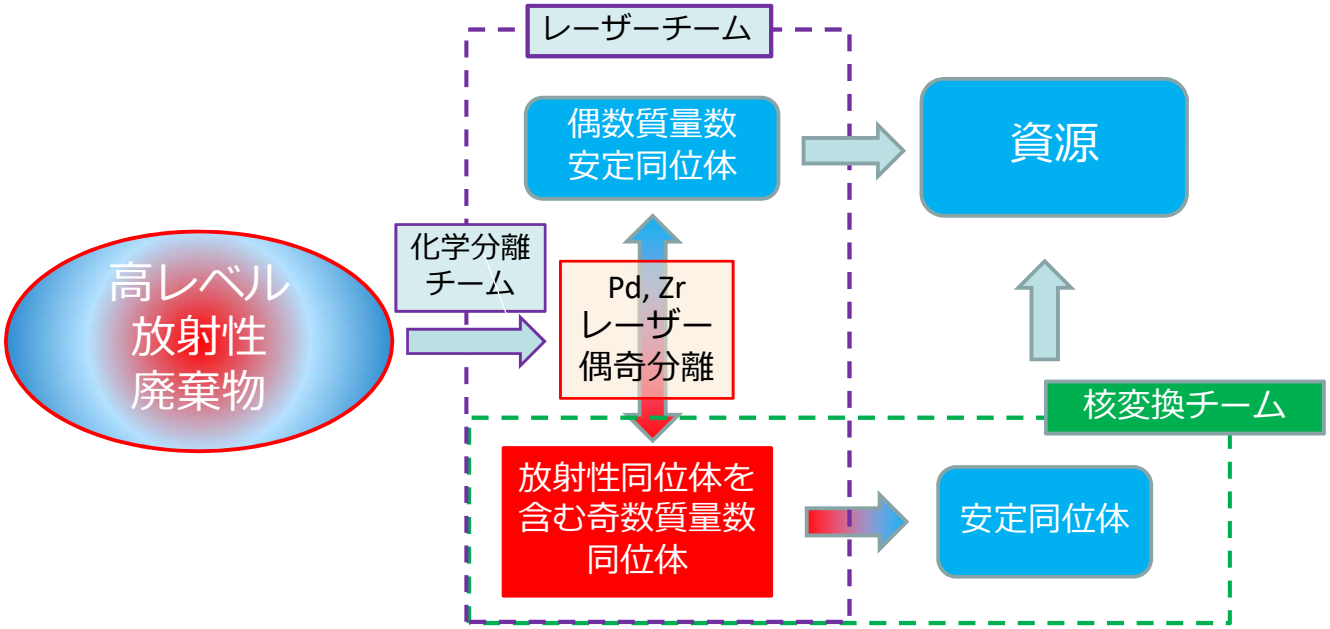
実験室レベルのレーザーで
どこまで可能か？

ジルコニウム(Zr) 72 kg

2014年4月現在、日本には17000トンの使用済み核燃料がある

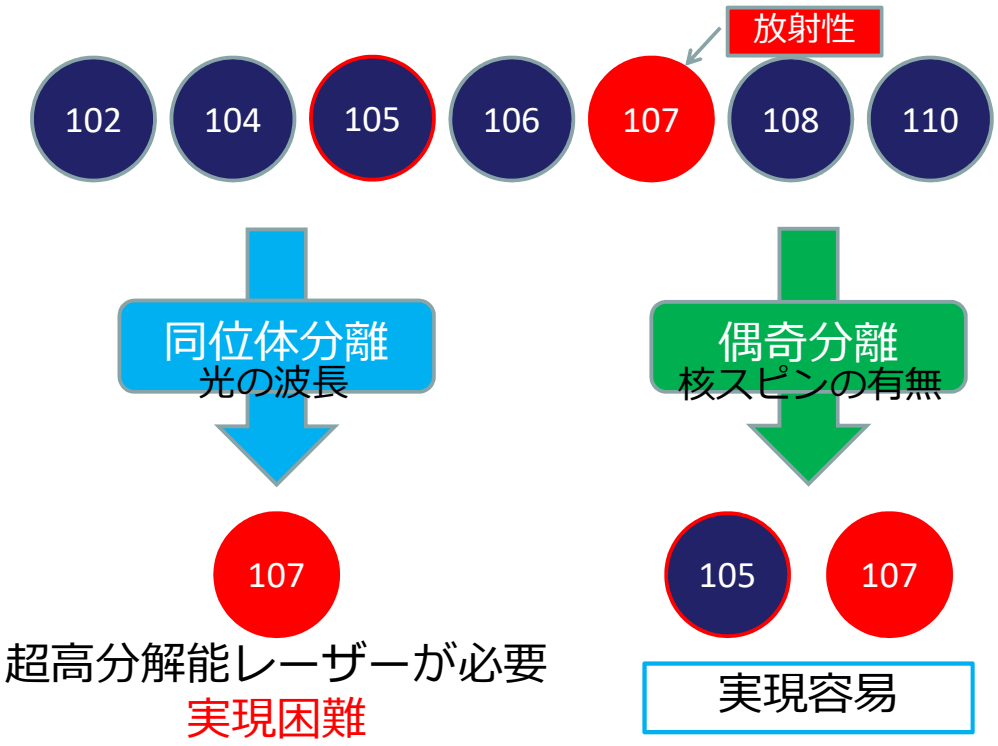
（そのうちパラジウム23トン、ジルコニウム61トン）

光学遷移選択則を利用したレーザー偶奇分離技術



（従来の）同位体分離法 vs. 偶奇分離法

放射性廃棄物中のパラジウム同位体

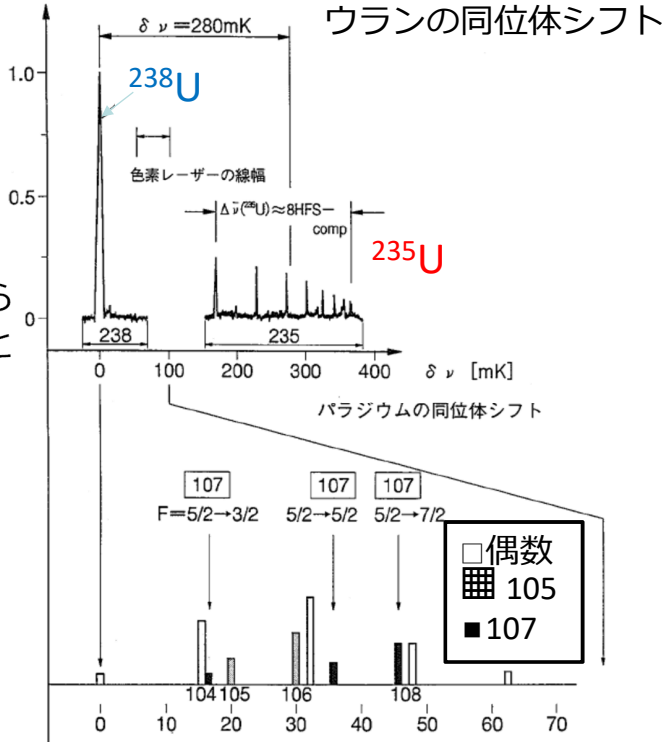


従来法：レーザー同位体分離

^{235}U濃縮を実現した方法

ウラン同位体分離で用いられたレーザーよりもずっと高い分解能が求められる。

実現困難

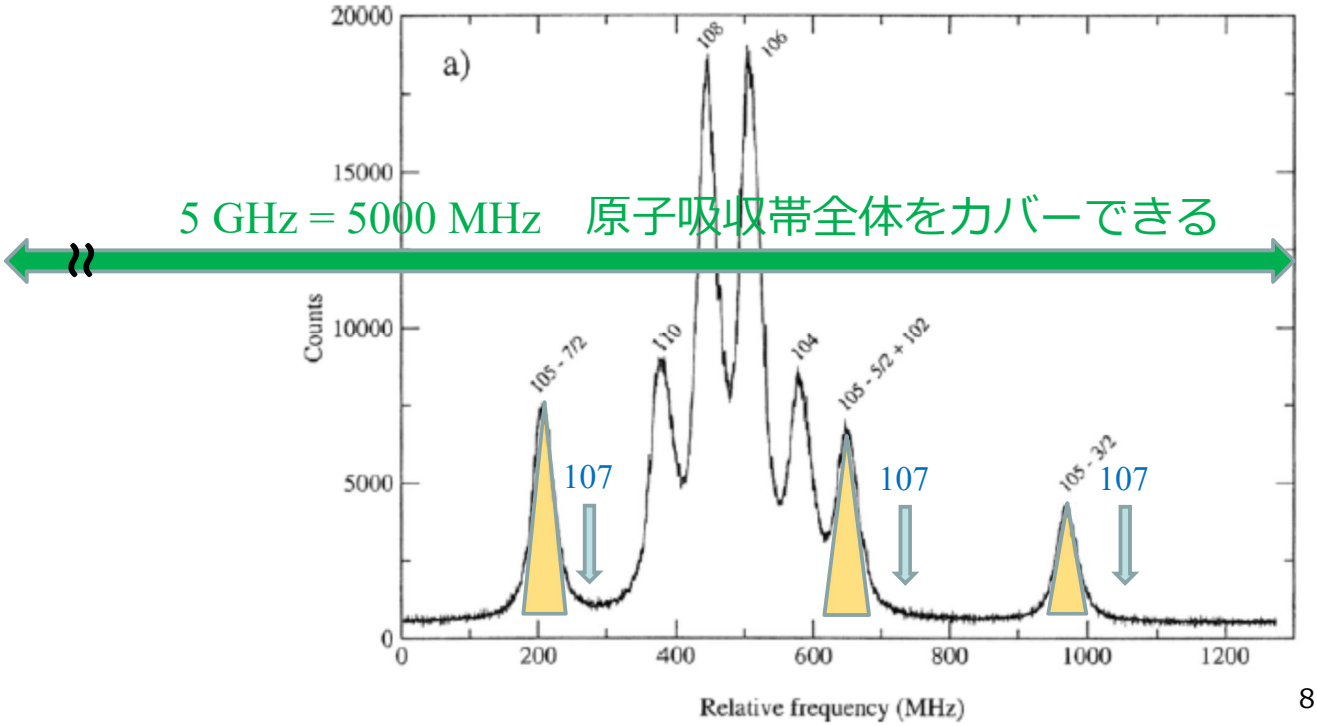


パラジウムの吸収スペクトル

レーザー偶奇分離の場合

偶奇分離に必要な装置性能
- 市販レーザーの分解能 (5 GHz)
- 偏光の正確な制御

$^{105, 107}$Pdだけが光を吸収する！



5 GHz = 5000 MHz　原子吸収帯全体をカバーできる

レーザー偶奇分離の原理

光吸収の選択則（量子力学）

奇数質量数同位体（^{105,107}Pd）

核スピン　$I = \frac{5}{2}$　レーザー光を吸収してイオンとなる

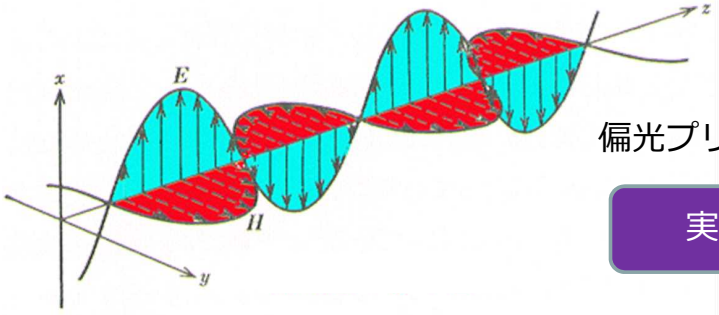
偶数質量数同位体（^{102,4,6,8,10}Pd）

核スピン　$I = 0$　レーザー光を吸収しない

この規則を実現する電子状態を選び、偏光レーザーを照射する

レーザー光：直線偏光と円偏光

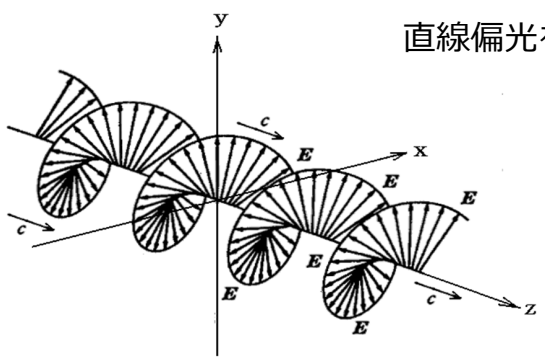
直線偏光　電界と磁界の振動方向が一定



偏光プリズムを透過させて生成する

実験上、偏光維持が容易

円偏光　電界と磁界の振動方向が進行に伴って回転する



直線偏光をさらに1/4波長板を透過させて生成する

完全な円偏光維持が困難

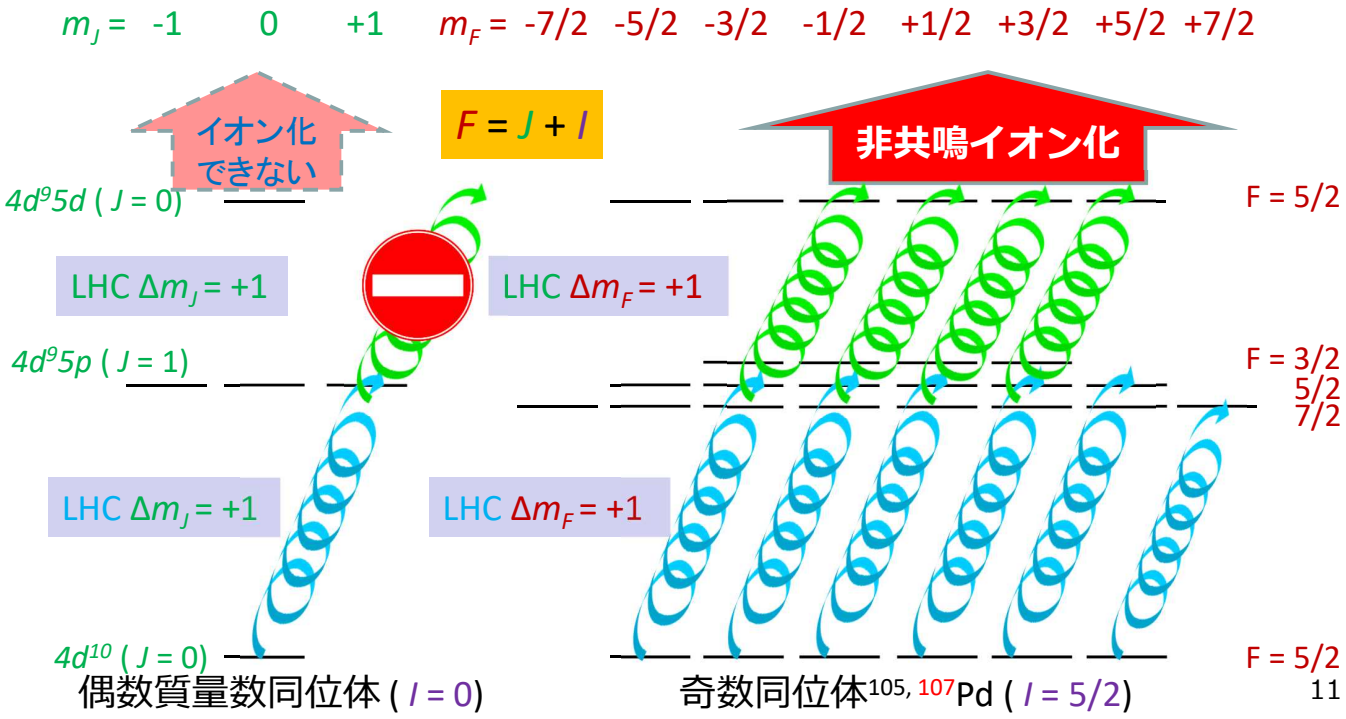
反射等による悪化

偶奇分離係数の低下

Hao-Lin Chenによるオリジナル偶奇分離法 (1980)

2 つの円偏光レーザーによる偶奇分離＋イオン化レーザー

奇数質量数同位体だけが光を吸収する ⇒ イオン化



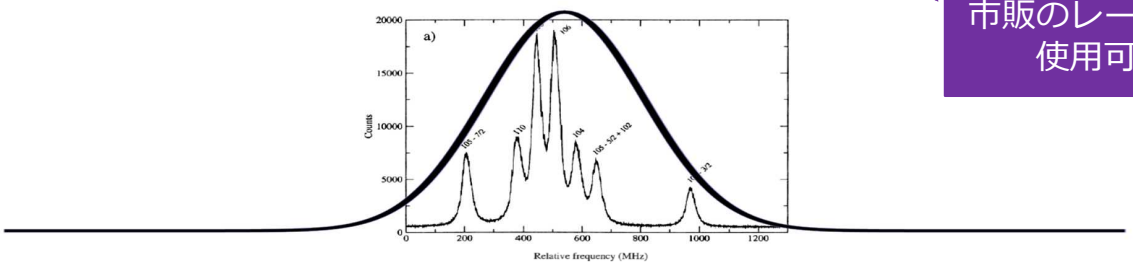
オリジナル偶奇分離スキームのメリット・デメリット

メリット

- 超高分解能レーザー不要

  むしろ同位体シフト等をカバーする広いスペクトル線幅が望ましい。

市販のレーザーを使用可能



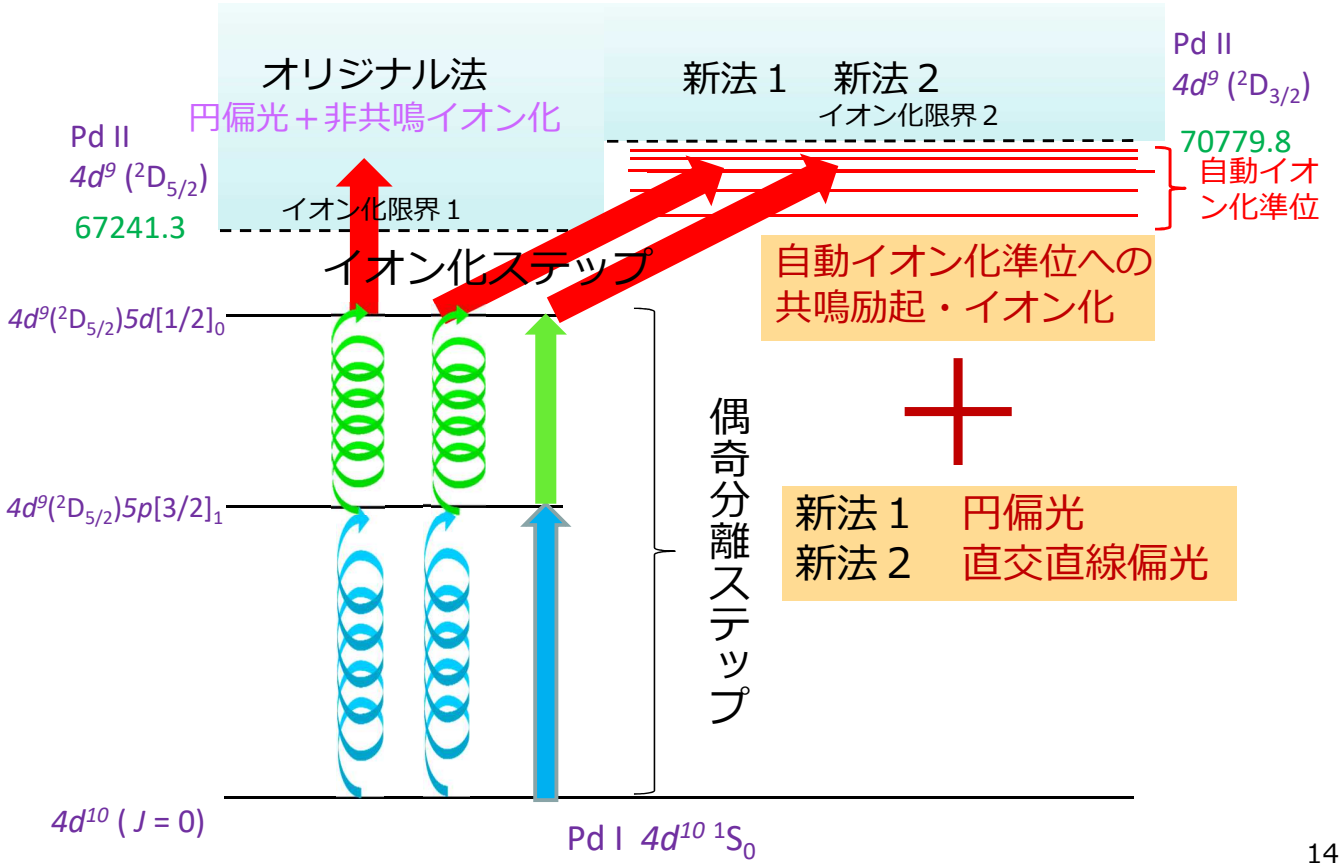
デメリット

- 円偏光レーザー：反射ミラーによる偏光度低下　等
- 非共鳴イオン化：低イオン化効率
- 異なる波長のレーザー３台：同軸入射に不適当、コスト高　等

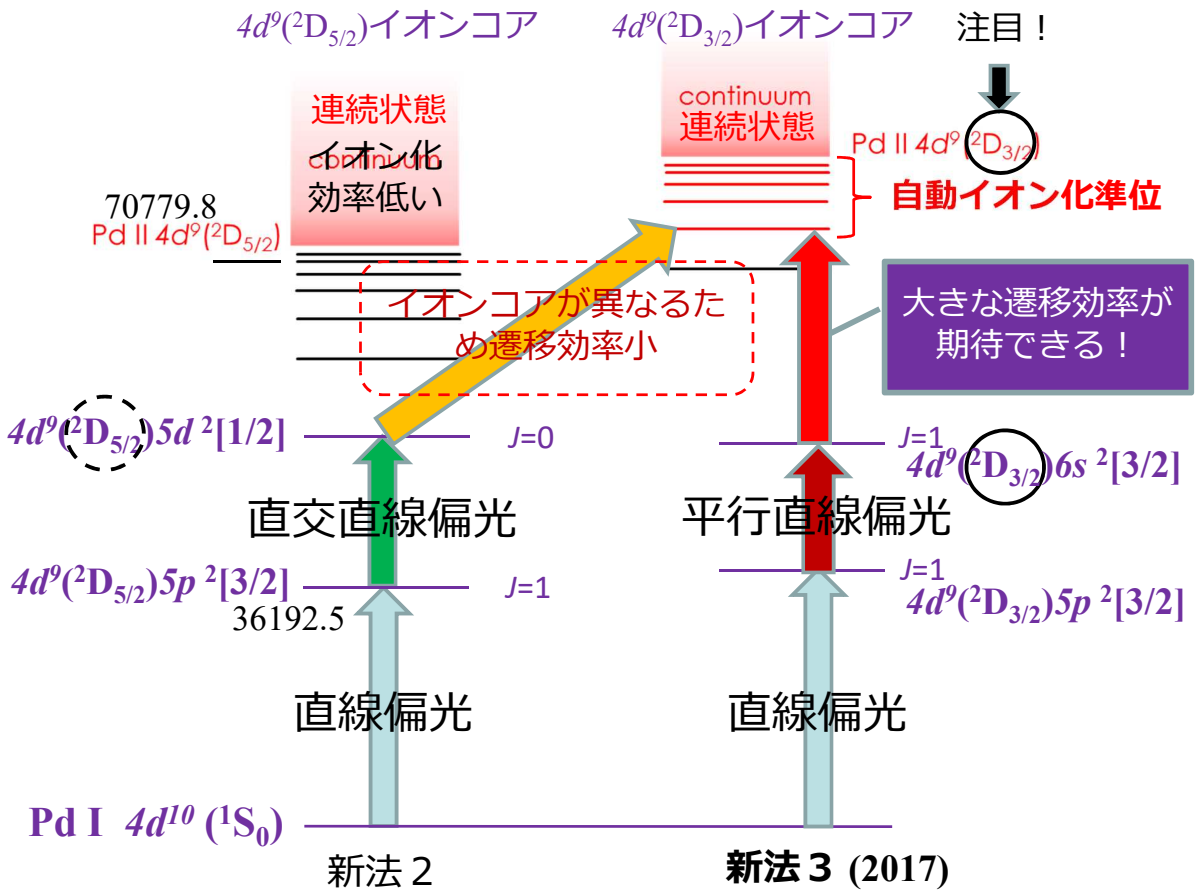
理研における研究開発ポイント

（１）直線偏光レーザーによる偶奇分離実現
（２）高分離係数達成
（３）イオン化効率向上：自動イオン化準位
（４）レーザー　３台⇒２台

新偶奇分離イオン化スキーム：新法１・新法２



新法３：共通イオンコアスキーム



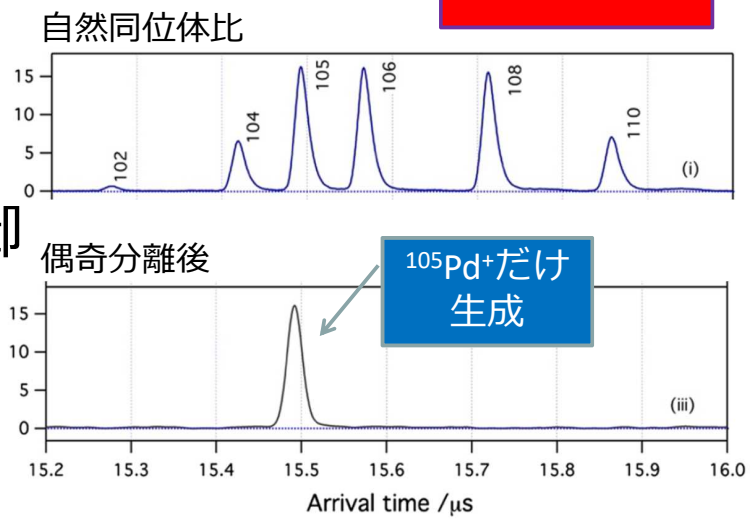
高分離係数の達成

レーザー強度と偏光の精密制御

１段目の紫外レーザーによる２光子イオンが偶奇分離係数低下の主原因と判明

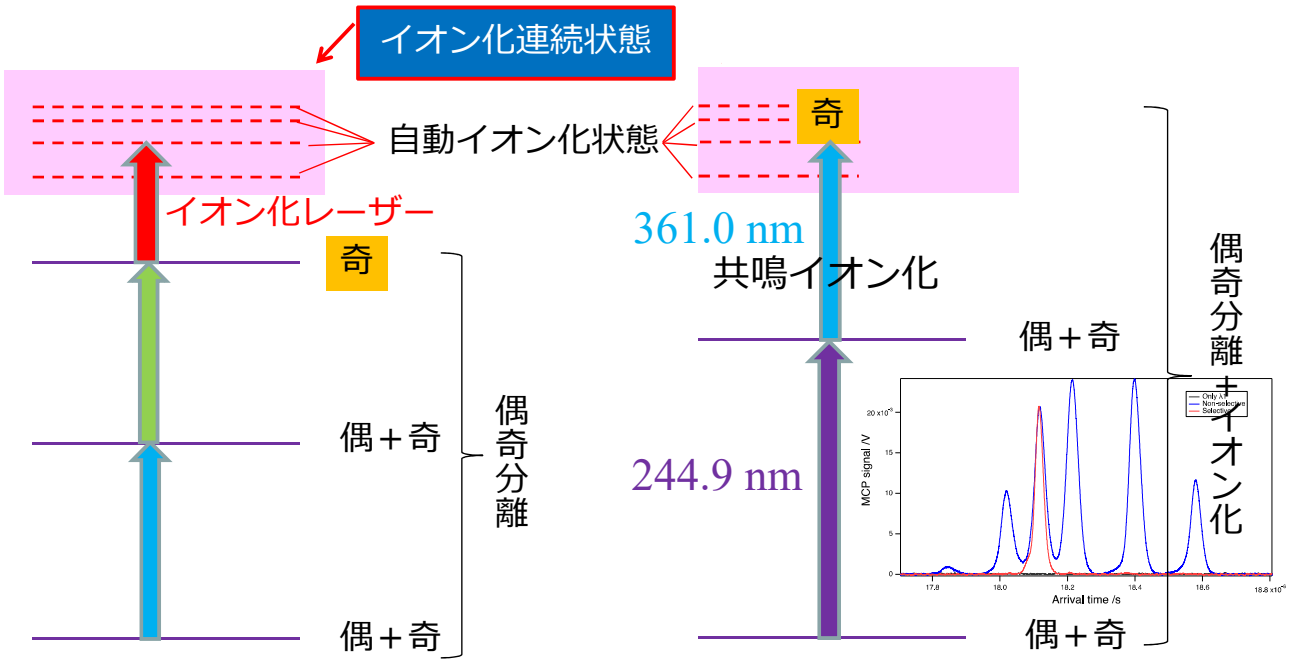
非選択的

レーザー強度の制御



分離係数 β > 1000 （^{105}Pd > 99.7 %）達成

さらなる革新：２レーザー偶奇分離

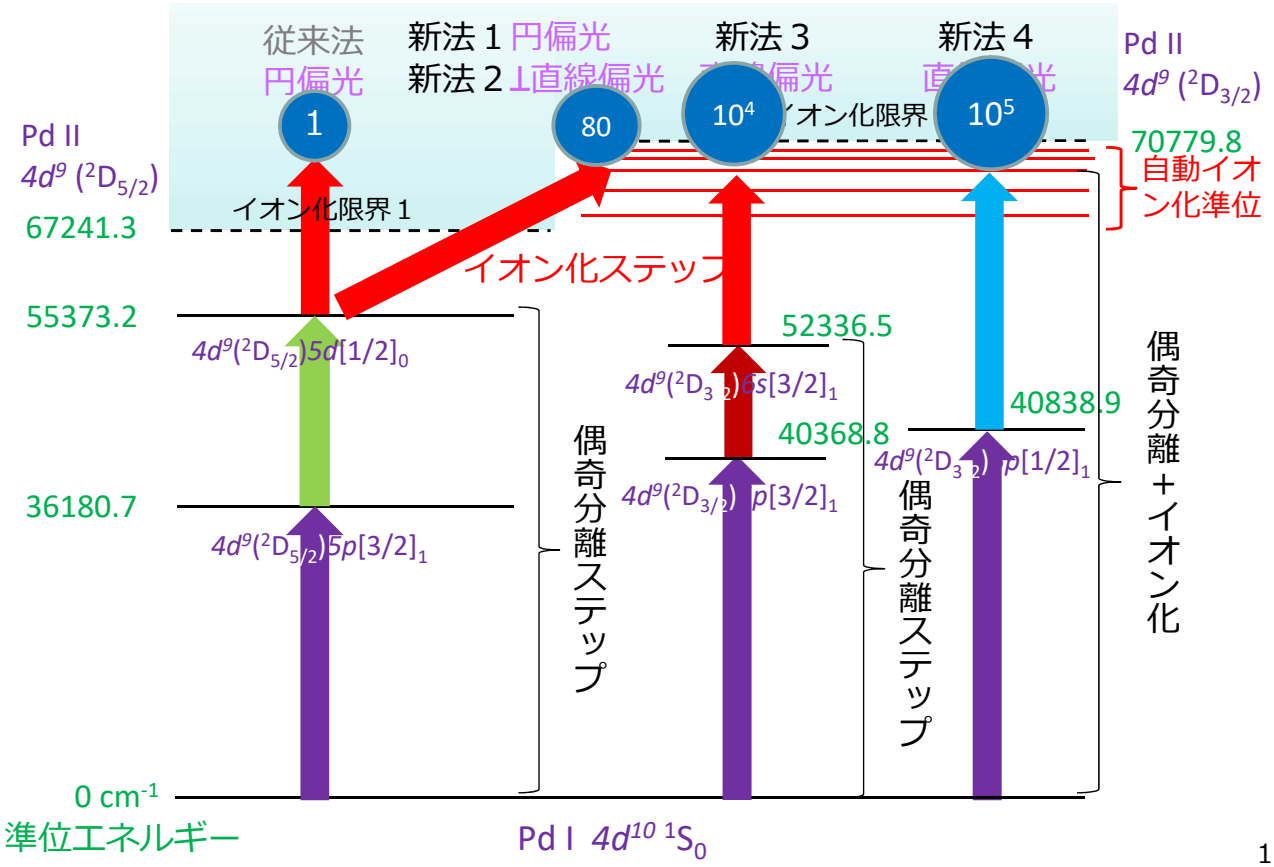


３レーザー偶奇分離

２レーザー偶奇分離

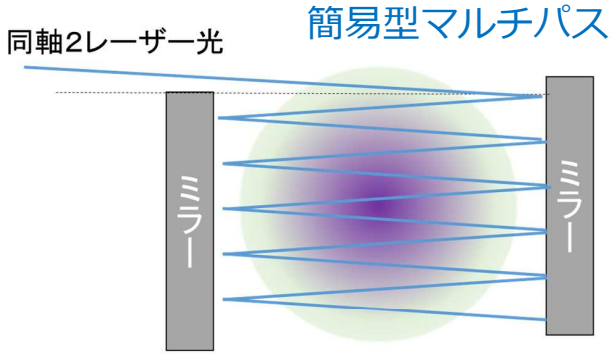
分離係数 $\beta > 1000$ 確認

各偶奇分離イオン化スキームの効率比較

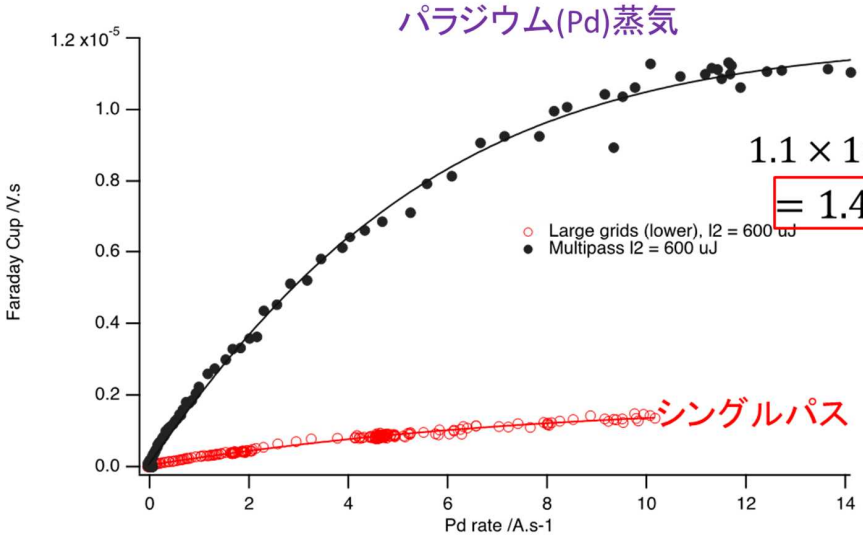


イオン収量増大に向けて

簡易型マルチパス光学系



パラジウム(Pd)蒸気



10パス

$1.1 \times 10^{-5} Vs$ @ 12.0 Ås^{-1}

$= 1.4 \times 10^{12}$イオン/レーザーパルス

1.4テラT

実用化レベルはどのくらい？

出力100万キロワットの原子力発電所１基から発生する使用済み核燃料に含まれるパラジウム全量（27kg / 年）を偶奇分離処理するための処理速度

$\Rightarrow 74\ g/$日

4.9×10^{14}イオン／レーザーパルス @10 kHz

490テラT ⟷ 1.4T

350倍！

現状

今後の開発計画

- パラジウム蒸気密度の増加
- マルチパス光学系の改良

Zrも

↓

試験装置１台の最大処理速度

↓

実用化施設の規模の試算

平成30年度末