

量子ウォークによる同位体分離の原理的研究

令和3年9月3日

日本原子力研究開発機構 物質科学研究センター

横山啓一

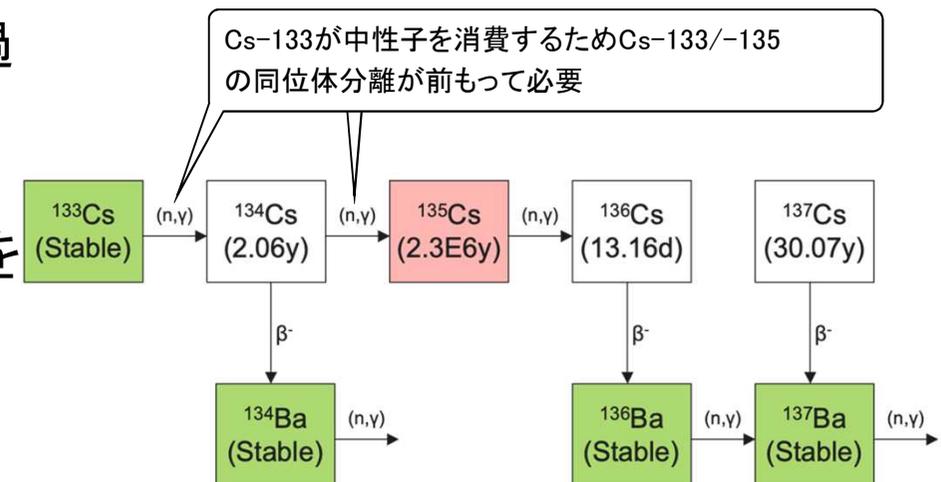
内容

1. 位置づけ
2. 量子ウォークについて
3. 研究課題とロードマップ
4. 研究状況
5. まとめ

1. 高レベル放射性廃棄物の潜在的放射性毒性の低減には、数百万年先まで放射性物質を出し続けるMA、LLFPを回収し、安定核に変換する技術が重要であり、これらを確立することで地層処分の負担を大幅に低減することが出来る。
2. LLFPの回収・核変換には分離性能向上や大強度加速器の確立など実現には様々な課題がある。
3. 特に、LLFPのうち半減期230万年のCs-135については、以下の課題があるが、有望な同位体分離技術は見つかっていない。

- ✓ 水溶性のため地層処分時の人工バリアを通過し、公衆被ばくリスクの要因となる。
- ✓ 使用済燃料に同位体元素であるCs-133が含まれており、中性子照射により新たにCs-135を生成してしまうことから、同位体分離なしに核変換による廃棄物有害度低減は有効な効果が得られない。

Cs-135を中性子捕獲により核変換する場合



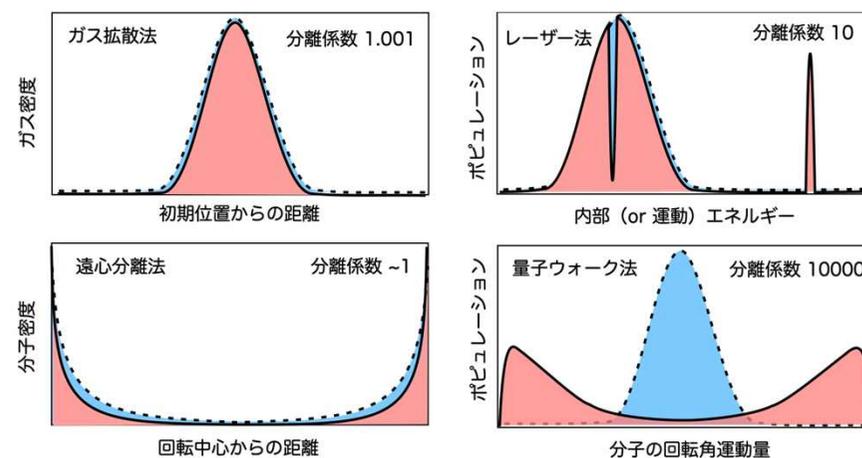
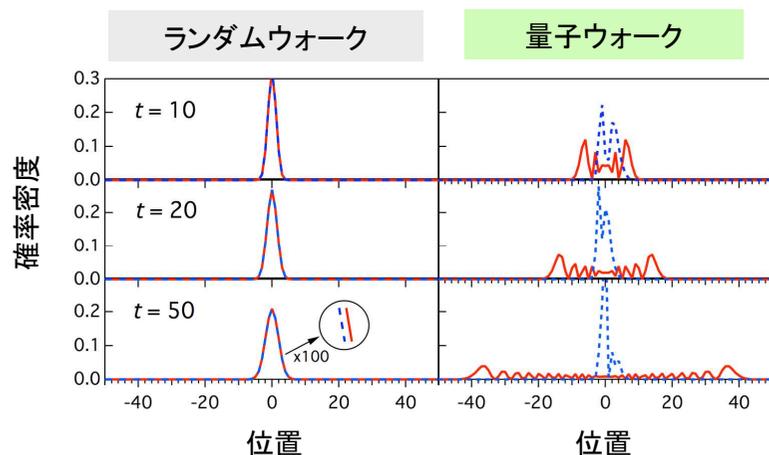
Cs-133が中性子を消費するためCs-133/-135の同位体分離が前もって必要

原子力機構 西原氏より

**重元素の精密同位体分離に関して必要処理量を見込める分離原理がない
⇒ 原理の探求を継続することが重要**

量子ウォークによる同位体分離とレーザー法同位体分離の関係は、量子コンピューターと従来型コンピューターの関係に似ている。

物質の存在を確率密度ではなく確率振幅(波動関数)として扱う。



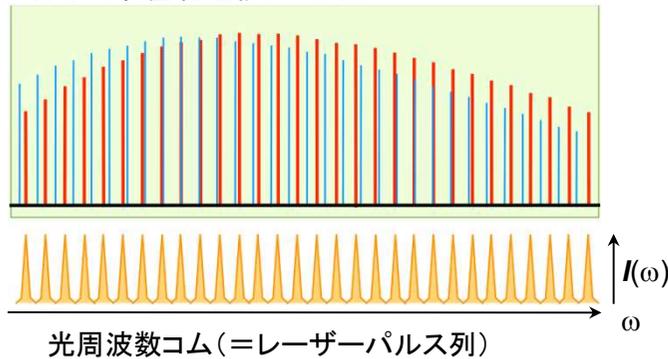
時刻0で位置0にあった物体を、図の左右方向に同じ遷移確率で移動させたときの古典拡散と量子拡散(量子ウォーク)の確率密度分布の違い。量子拡散では同位体(赤と青)の差を驚異的に増幅できる。

ウラン濃縮に用いられた3つの分離法と量子ウォーク法の分離原理の概念的な違い。量子ウォーク(右下)は分布自体を分離できるため、熱揺らぎ・熱雑音を凌駕する革新的な分離原理に発展する可能性がある。

テラヘルツ波周波数コムを二原子分子に照射することにより回転角運動量空間において量子ウォークが実装されることを発見した。

実用化に向けた課題は、テラヘルツ波領域で任意の周波数コムを作る技術、回収技術、多原子分子への原理の拡張 (Cs以外に適用する場合)。

分子の純回転遷移スペクトル

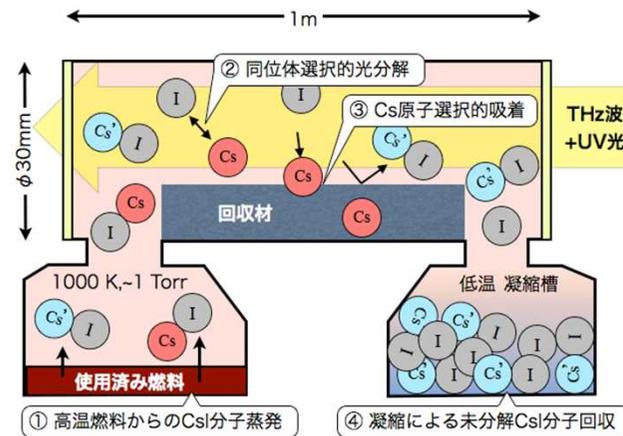


光周波数コム (=レーザーパルス列)

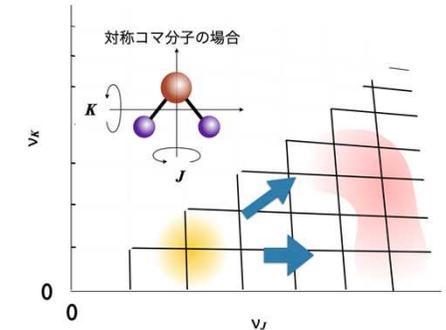
テラヘルツ周波数コムの作成技術

ロードマップ

	2009	2014	2016	2018	2019	2022	2029~
原理の発見		N ₂ 分子で前駆的現象を確認	回収材C ₆₀ の有効性を予想	C ₆₀ の機能性を放射光分析で確認	実証研究のTHz波強度に目処	THz波で基本原理実証 回収反応の概念実証	工学的研究



回収技術



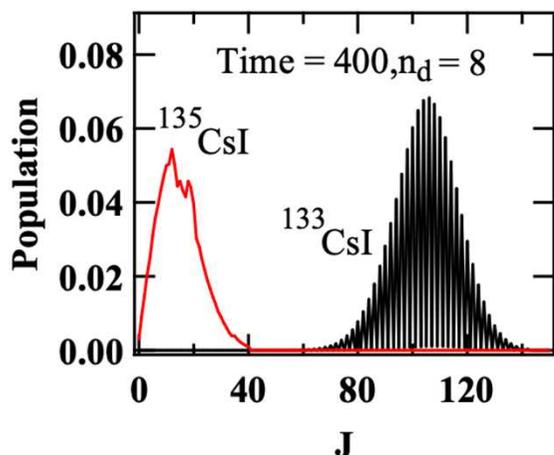
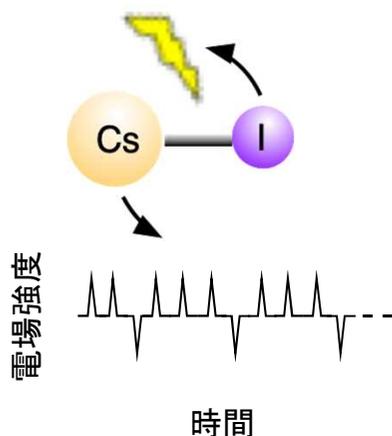
$$F(J,K) = B_J(J+1) + (A-B)K^2 - D_K K^4 - D_{JK} J(J+1)K^2 - D_J J^2(J+1)^2$$

$K = 0, 1, \dots, J$ $\Delta J = \pm 1, \Delta K = \pm 1$

多原子分子への原理拡張

これまでに、計算機実験、可視光周波数コムによる前駆的現象の確認、回収材候補の物性確認を達成した。今後は、テラヘルツ波での基本原理実証、回収反応の概念実証、処理速度などの工学的研究を目指す。

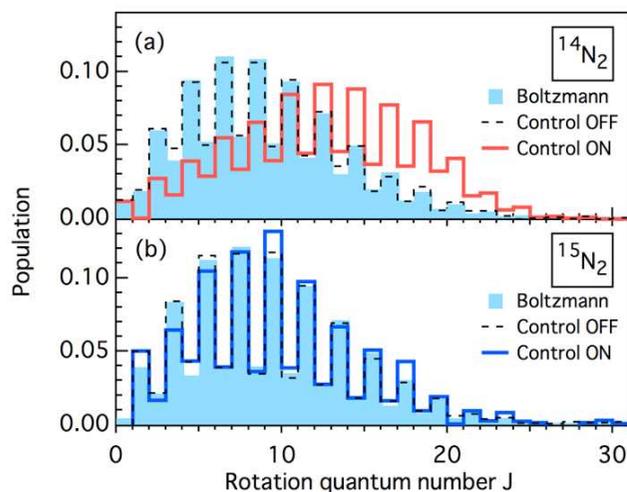
計算機実験による量子ウォーク実装の発見



^{133}CsI 分子の回転周期に同期させたテラヘルツ波領域の周波数コム(パルス列)を同位体の混在する $^{133,135}\text{CsI}$ 分子に作用させると、 ^{133}CsI のみに対して回転分布を元の位置から完全に移動させ得ることを計算機実験により見出した。

L. Matsuoka et al., "Theoretical Study for Laser Isotope Separation of Heavy-Element Molecules in a Thermal Distribution", Proceedings of GLOBAL 2011, 392063 (2011).

光周波数コムによる前駆現象の確認

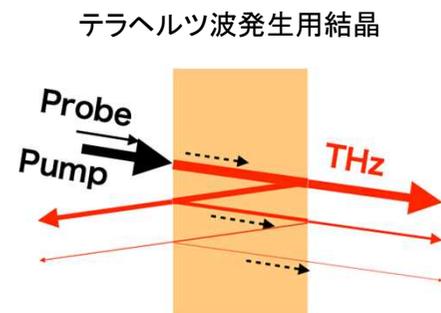


$^{14}\text{N}_2$ 分子の回転周期に同期させた可視光周波数コムを N_2 気体試料に照射し $^{14}\text{N}_2$ のみ回転分布移動することを確認した。

F. Yoshida et al., "Displacement of rotational-state distribution in diatomic molecules with a train of femtosecond laser pulses", CLEOPR 2013, pp. 1-2, doi: 10.1109/CLEOPR.2013.6600497.

光周波数コム照射前(点線)と後(赤or青線)の窒素分子の回転分布測定例。パルス列の数が不十分のため分布移動は途中で止まっている。

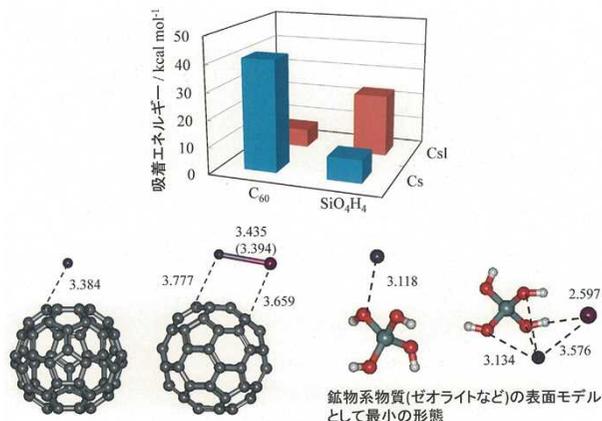
実証研究に必要なテラヘルツ波強度の発生確認



横山啓一他「OH1 を用いたテラヘルツ波発生直後の波形計測」第66回応用物理学会春季学術講演会, 10p-PB2-5 (2019).

テラヘルツ波発生用結晶を検出にも用いる工夫により発生直後の強度が十分高いことを確認した。

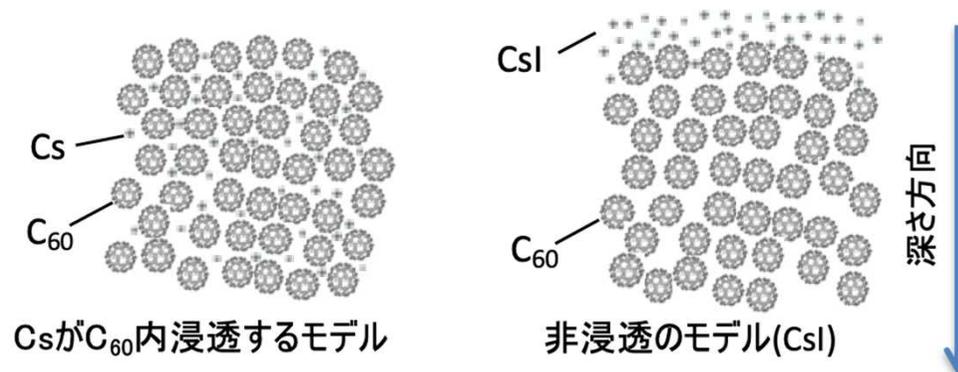
回収材候補の探索



量子化学計算により有望な候補としてC₆₀に着目。

T. Kobayashi et al. J. Nucl. Sci. Tech. 53, 1489-1493 (2016).

回収材に必要な性質の確認



Cs原子がC₆₀内部へ吸蔵されると同時に、CsI分子は吸蔵されないことを放射光分析により確認した。

T. Sekiguchi et al. Proc. Nucl. Sci. Tech. 5, 161-164 (2018).

数学コミュニティとの連携

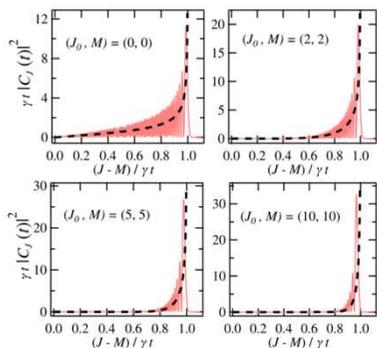


Fig. 1. (Color online.) Comparison of the limit distributions derived from Eq. (3.44) and numerical simulations for $r = 0$ and $M = 0, 2, 5, 10$.

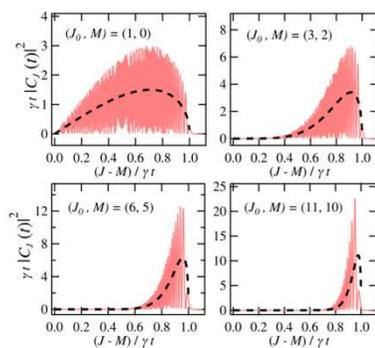


Fig. 2. (Color online.) Comparison of the limit distributions derived from Eq. (3.44) and numerical simulations for $r = 1$ and $M = 0, 2, 5, 10$.

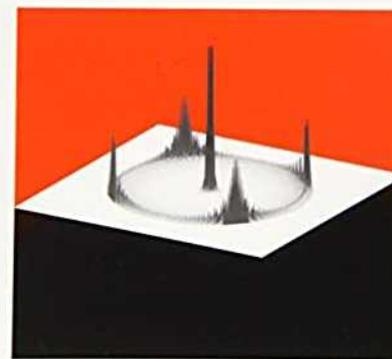
数値計算ではなく解析式により極限分布を計算可能に。

L. Matsuoka et al. Phys. Lett. A 381, 1773-1779 (2017).

量子ウォークの新展開

[数理構造の深化と応用]

今野紀雄・井手勇介 共編著



培風館

「量子ウォークの新展開」今野紀雄、井手勇介 (2019、培風館)

第17章 量子ウォークを用いた同位体分離による放射性廃棄物の無害化研究 (横山啓一、松岡雷士)

量子ウォークの明確な物理的応用はトポロジカル絶縁体と同位体分離のみ掲載。

- ・ FPの核変換に必要となる同位体分離の原理的な問題点を整理。
- ・ 量子ウォークの原理的優位性に着目し、Cs同位体分離への適用可能性を検討。
- ・ 前駆現象の確認に成功すると共に、回収材候補の有効性を確認。
- ・ 数学者らとの緊密なネットワークを構築。
- ・ 今後はテラヘルツ波による基本原理実証と回収原理実証、さらには工学的研究と分離回収システム設計を目指す。

8 そして未来へ

量子ウォークの非常に大きな応用の可能性の一つは、放射性廃棄物低減への応用だ。(中略) 実は、量子ウォークを用いた放射性セシウムの同位体分離につながる理論が提案されている ([35], [82], [83]). さらに量子ウォークのモデルを改良することにより、実用の段階に至る期間を短縮する研究は急務である。これは数学の問題だけでなく、物理学、化学、工学など様々な分野を取り込んだ学際的、しかも国家的プロジェクトとなるべきであろう。