Studsvik

2023年度第9回ゼロカーボンエネルギー研究所コロキウム
原子力将来シナリオ研究と解析手法の開発動向



# 日本における最適濃縮度の検討
## ー日本にHALEUは必要か？ー
## 【公開版】

（株）スタズビック・ジャパン
山崎　正俊
February, 2024

※当資料作成にあたっては、京都大学原子力研究所 宇根崎博信先生にご助言いただいた

# HALEUとは

- HALEU = High-Assay Low Enriched Uraniumの略。米国人は「ヘイリュー」、片仮名では「ハーリュー」か。濃縮度5wt%超～20wt%未満のウラン燃料を称する（下図）
- 5wt%超～10wt%未満は、LEU+もしくはExtended Enrichment (=EE) 、Increased Enrichment (=IE)と称している

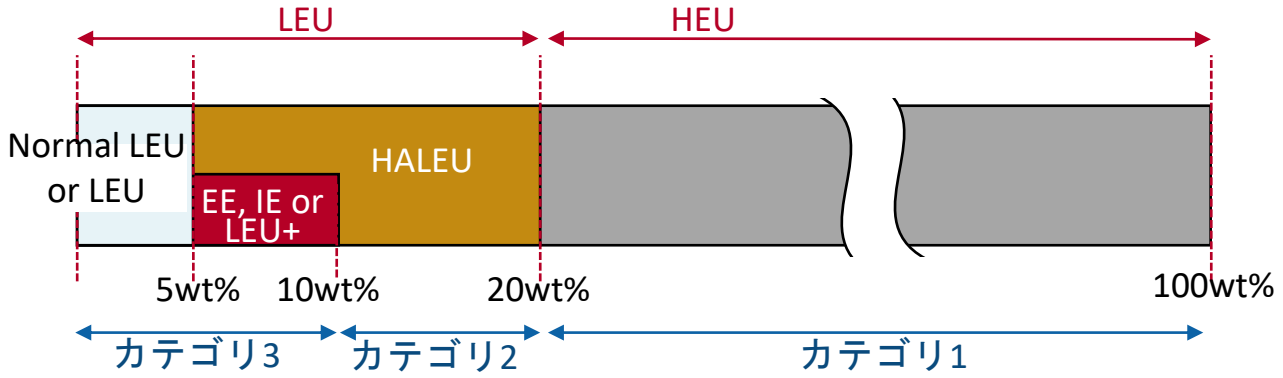



表1　附属書Ⅰ、核物質の国際輸送において適用される防護の水準

| 核物質の区分 | 国際輸送中の貯蔵における防護の水準 | 国際輸送中の防護の水準 |
|---|---|---|
| 第　1　群 | 第2群について定める防護区域内に置き、かつ、信頼性の確認された者のみが出入りでき、警備員が関係当局と緊密な連絡体制にあるようにすること。 | 第2群及び第3群の輸送について定める特別の予防措置をとるとともに、護送者により常時監視し、かつ、関係当局との緊密な連絡体制が確保される条件の下で輸送すること。 |
| 第　2　群 | 警備員又は電子装置により常時監視し、かつ、物理的障壁によって囲まれた区域内に置くこと。 | 荷送人、荷受人及び運送人の間で事前に取り決められる措置等の特別の予護措置の下で輸送すること。 |
| 第　3　群 | 出入りが規制されている区域内に置くこと。 | |

（注）この表は、国際輸送中の核物質について、附属書Ⅱに定める区分に応じた防護の水準の概略を示すものである。

[出典] 外務省原子力課(監修):原子力国際条約集、(社)日本原子力産業会議（1993年6月）

表2　附属書Ⅱ、核物質の区分表

| 核　物　質 | 形　態 | 第　1　群 | 第　2　群 | 第 3 群（注 c） |
|---|---|---|---|---|
| 1. プルトニウム（注a） | 未照射（注b） | 2kg 以上 | 500gを超え 2kg 未満 | 15g を超え 500g以下 |
| 2. ウラン235 | 未照射（注b） ウラン235の濃度が20%以上のウラン | 5kg 以上 | 1kg を超え 5kg 未満 | 15g を超え 1kg 以下 |
| | 未照射（注b） ウラン235の濃度が10%以上20%未満のウラン | | 10kg 以上 | 1kg を超え 10kg未満 |
| | 未照射（注b） ウラン235の濃度が天然ウランにおける混合率を超え10%未満のウラン | | | 10kg以上 |
| 3. ウラン233 | 未照射（注b） | 2kg 以上 | 500gを超え 2kg 未満 | 15g を超え 500g以下 |
| 4. 照射済燃料 | | | 劣化ウラン、天然ウラン、トリウム又は低濃縮燃料（核分裂性成分含有率10%未満）（注d 注e） | |

（注a）すべてのプルトニウム（プルトニウム238の同位体濃度が80%を超えるプルトニウムを除く。）

# なぜHALEU? (1)：革新炉(ARDP)

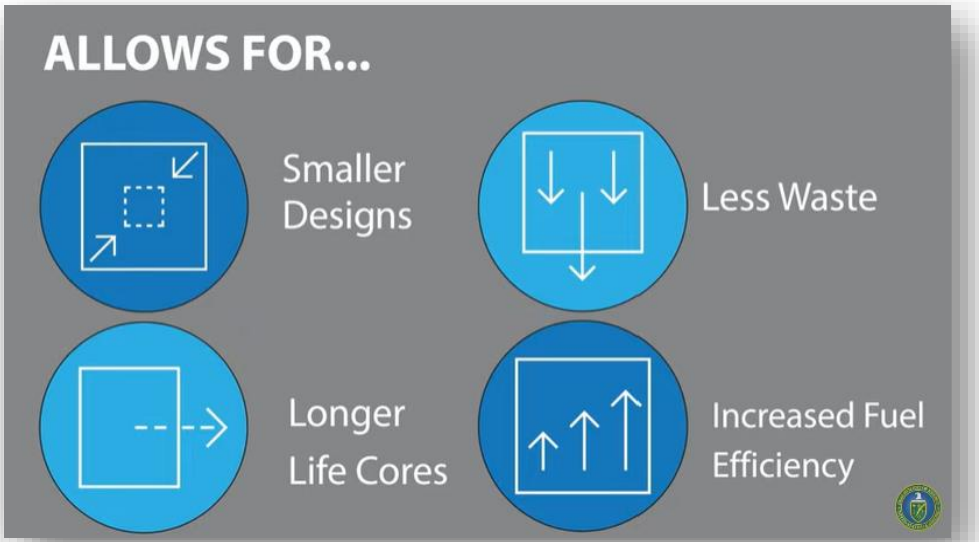
- 特に米国では、DOEが採択したAdvanced Reactor Demonstration Programにおいて、10炉中9炉がHALEUの利用を想定している
- 小型化、長期サイクル、使用済燃料低減、燃料有効利用の実現のため

**9 of 10 Reactors Funded by DOE's Advanced Reactor Demonstration Program Need HALEU**

| Company | Fuel | Company | Fuel |
|---|---|---|---|
| TerraPower | HALEU | Southern Company | HALEU |
| X-energy | HALEU | Westinghouse | HALEU |
| BWXT | HALEU | ARC Clean Energy | HALEU |
| Holtec International | LEU | General Atomics | HALEU |
| Kairos Power | HALEU | MIT Massachusetts Institute of Technology | HALEU |

Centrus

ARDP




米国DOEのHALEUに関するホームページ
https://www.energy.gov/ne/haleu-availability-program

| Fuel Cycle Approach Categories | SMR designs by type of coolants and technology characteristics | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | Water-cooled Reactors | HTGRs | Liquid-metal cooled and Fast Reactors | Molten Salt Reactors | Microreactors |
| Enrichment < 5% | CAREM, NuScale, VBER, NUWARD and ACPR50S | | | Integral SMR Stable Salt Reactor | MoveluX |
| 5% ≤ Enrichment ≤ 15% | | HTR-PM, PBMR, GTHTR300 | BREST-300-OD, 4S, EM², ARC100, Superstar | ThorCon | Energy Well |
| Enrichment > 15% | KLT-40S, RITM, SHELF, ABV-6M | MHR-T, MHR-100, GT-MHR, SC-HTGR, Xe-100, | SVBR, SEALER, LFR-TL-X, W-LFR | ThorCon | eVinci®, Aurora, MMR |

"Advances in Small Modular Reactor Technology Developments", 2020 Edition

# なぜHALEU? (2)：事故耐性燃料(ATF)

- 既設軽水炉においても、ウラン濃縮度の上昇により原子炉利用率の向上（運転サイクル長期化）と使用済燃料の削減（高燃焼化）を同時に実現可能
- 米国では事故耐性燃料（ATF）の実用化への取り組みが本格化。その際、濃縮度5ー10%のウラン（LEU+）を用いることで経済性の向上も図る

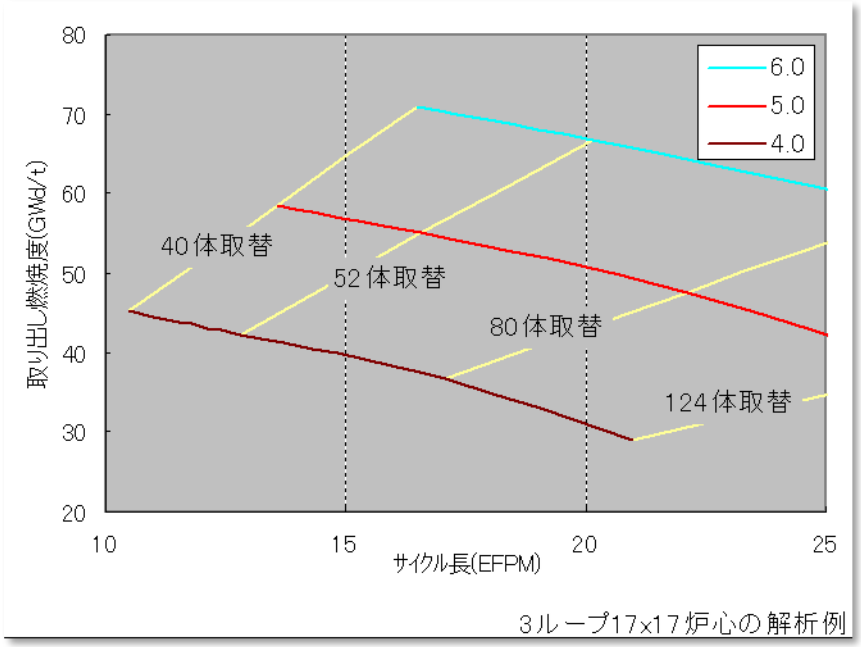
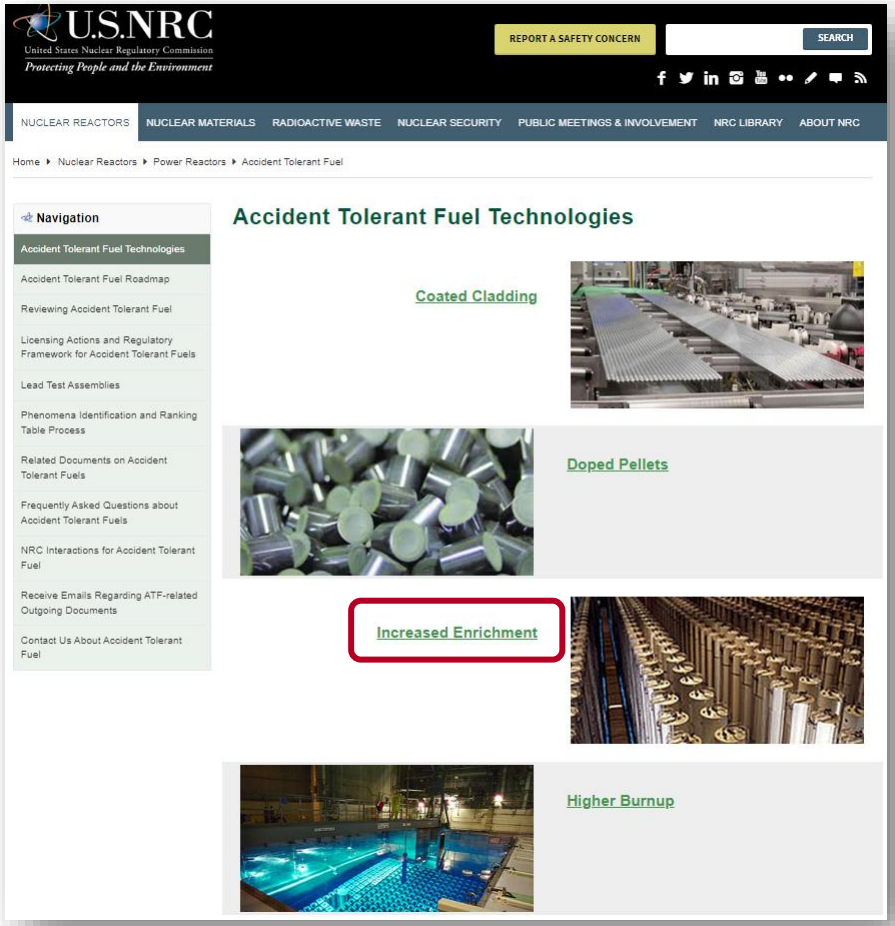



図 濃縮度と運転サイクル長および取出燃焼度の相関
（国内PWRにおける評価例）




米国NRCのATFに関するホームページ

# 検討課題

- わが国の方針は使用済燃料を再処理し、高速炉で活用していくクローズドサイクルである。その場合、
  - 再処理工場の設備容量、導入時期
  - 高速炉の基数、導入時期、それに伴うプルトニウム消費量、転換量
  - 必要となる天然ウラン量、濃縮後の劣化ウラン量、再処理後の回収ウラン量、プルトニウム生成量

などのパラメータを考慮した際、高濃縮度化が本当に最適な戦略か？

- ワンススルーの米国において高濃縮度化のメリットはわかりやすい。翻って、クローズドサイクルのわが国における最適解について議論を始めたい


当資料の転送・転載・複製はご遠慮ください

Studsvik