

トリウム燃料の製造について

原子燃料工業(株) 大岡 靖典



弊社の了解なしに転載、複製、第三者に開示されることは固くお断り申し上げます

報告内容

- 原子炉燃料の概要
- トリウム燃料の製造実績
- 加工工場の許認可に関する考察
- まとめ



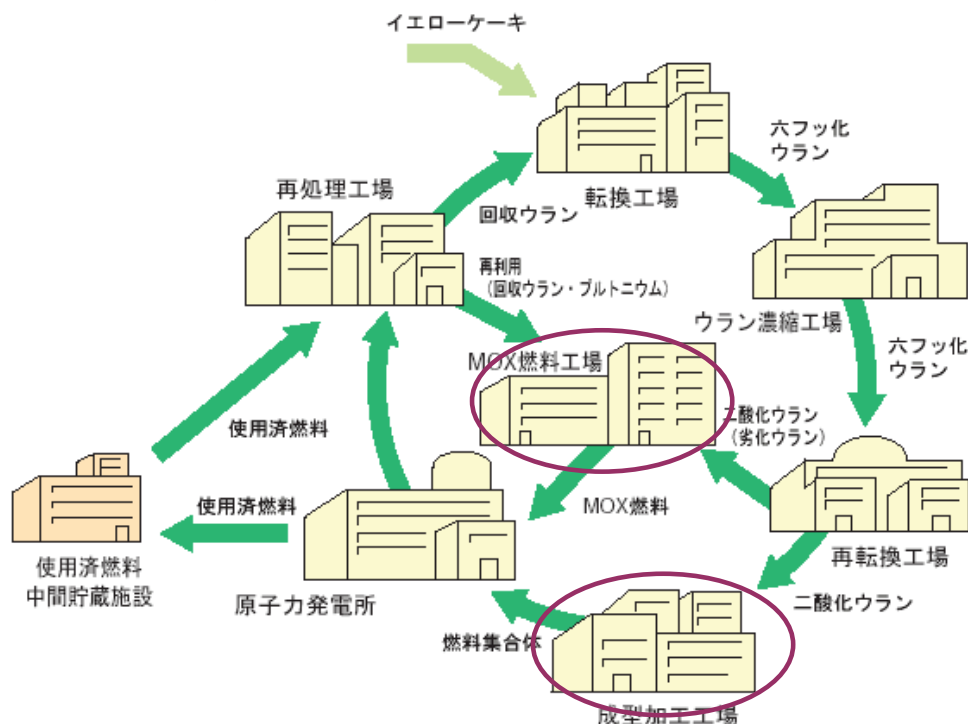
報告内容

- 原子炉燃料の概要
- トリウム燃料の製造実績
- 加工工場の許認可に関する考察
- まとめ



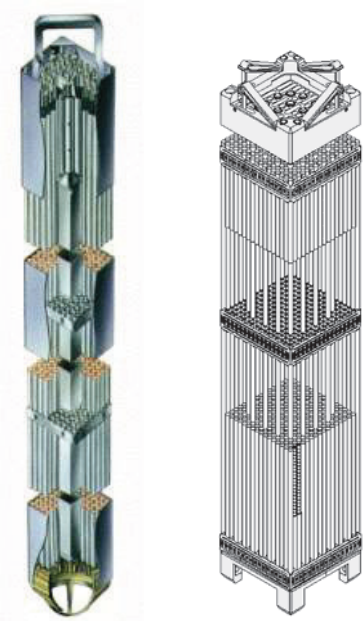
原子燃料の概要(1/5)

● U-Pu原子燃料サイクル



原子燃料の概要(2/5)

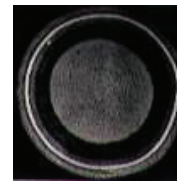
● 当社製燃料



BWR燃料集合体 PWR燃料集合体



ATR燃料集合体
(ウラン燃料)



被覆粒子断面図
($\phi 0.9\text{mm}$)



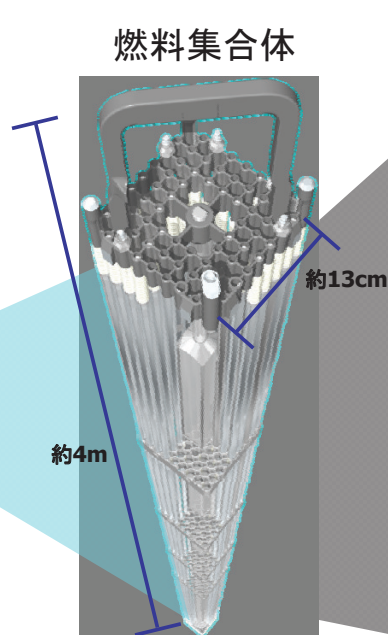
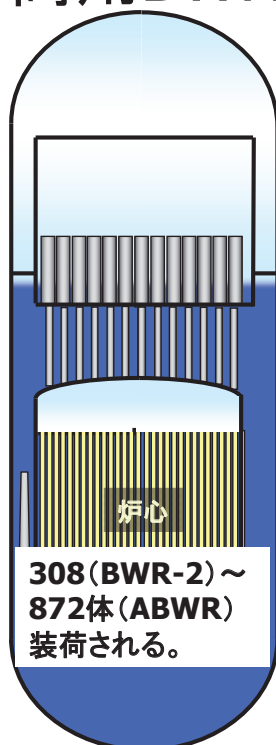
HTRの
被覆粒子
(コンパクト)



FBR燃料
(ウラン燃料・部材)

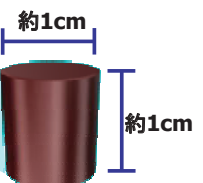
原子燃料の概要(3/5)

● 商用BWR燃料



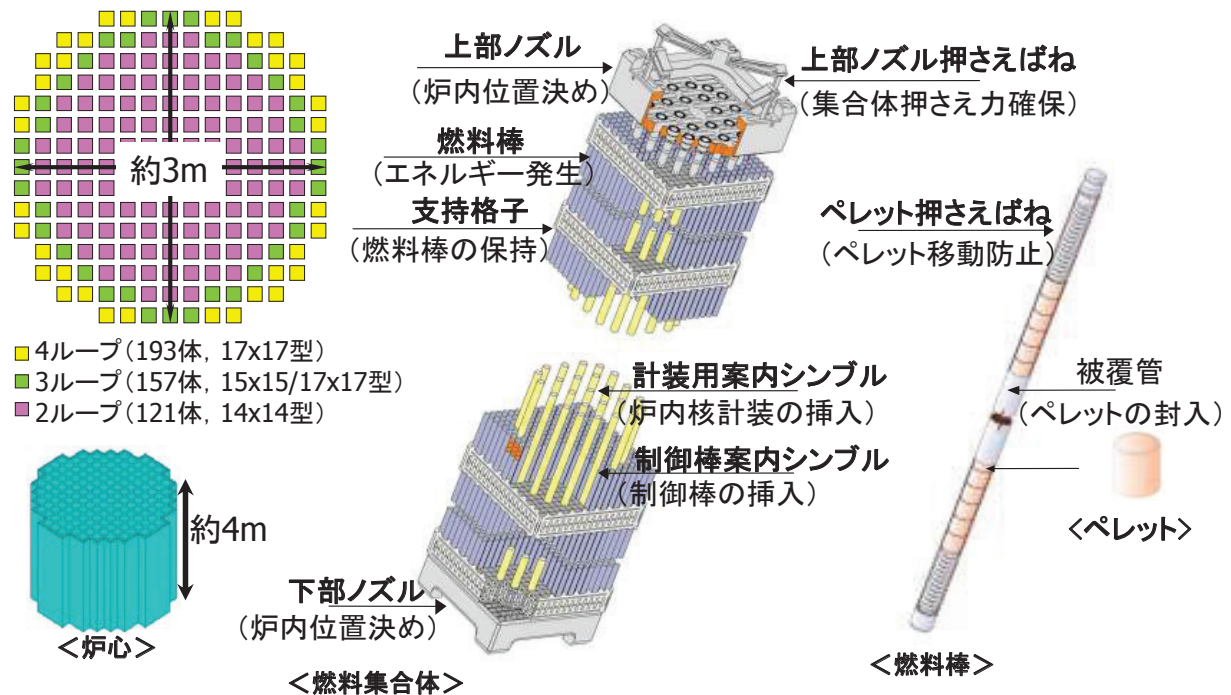
燃料棒

ウランペレット



原子燃料の概要 (4/5)

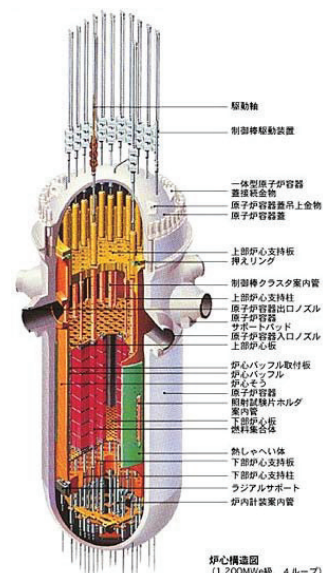
● 商用PWR燃料



原子燃料の概要 (5/5)

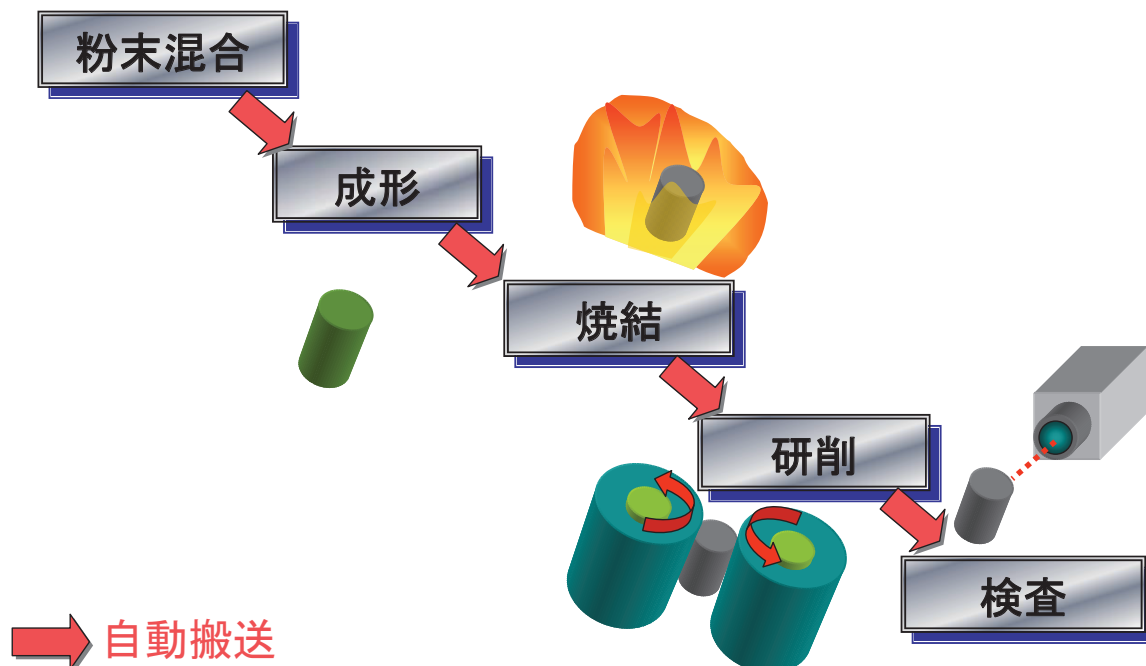
● 原子炉燃料使用環境

- 圧力; 約150気圧 (PWR), 約70気圧 (BWR)
- 温度; 約280~320°C (PWR), 約220°C (BWR)
- 放射線照射 (成長, 脆化)
- 耐機械的強度 (装荷時, 地震時)



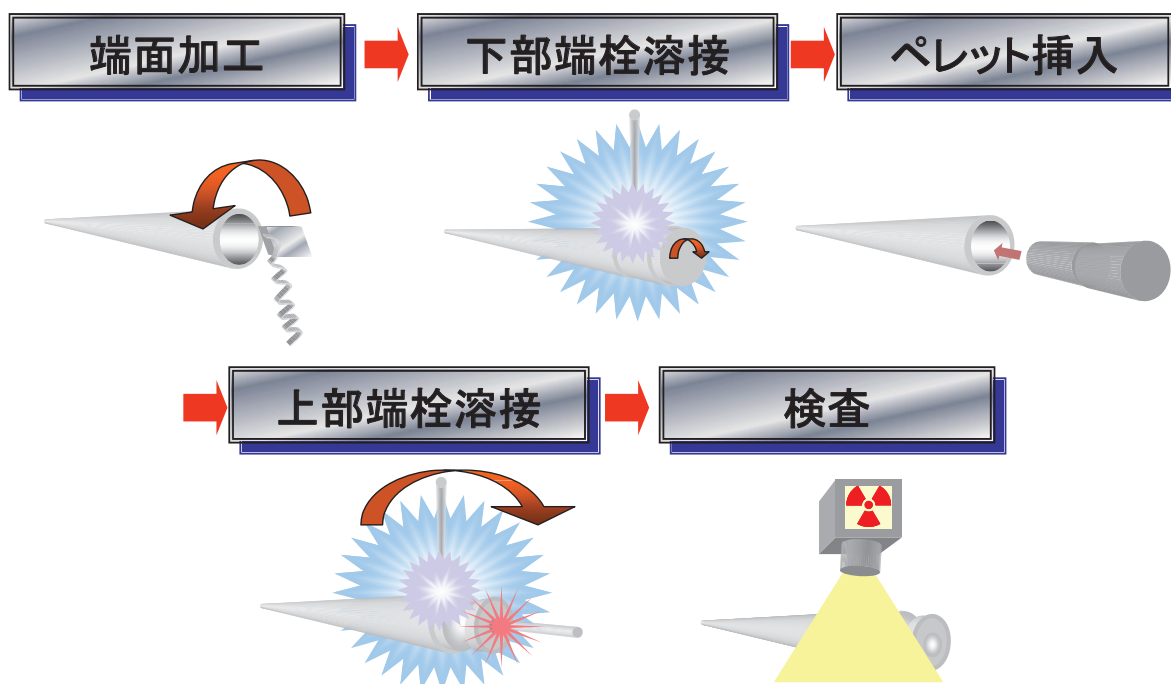
原子燃料の製造プロセス(1/3)

●ペレット加工



原子燃料の製造プロセス(2/3)

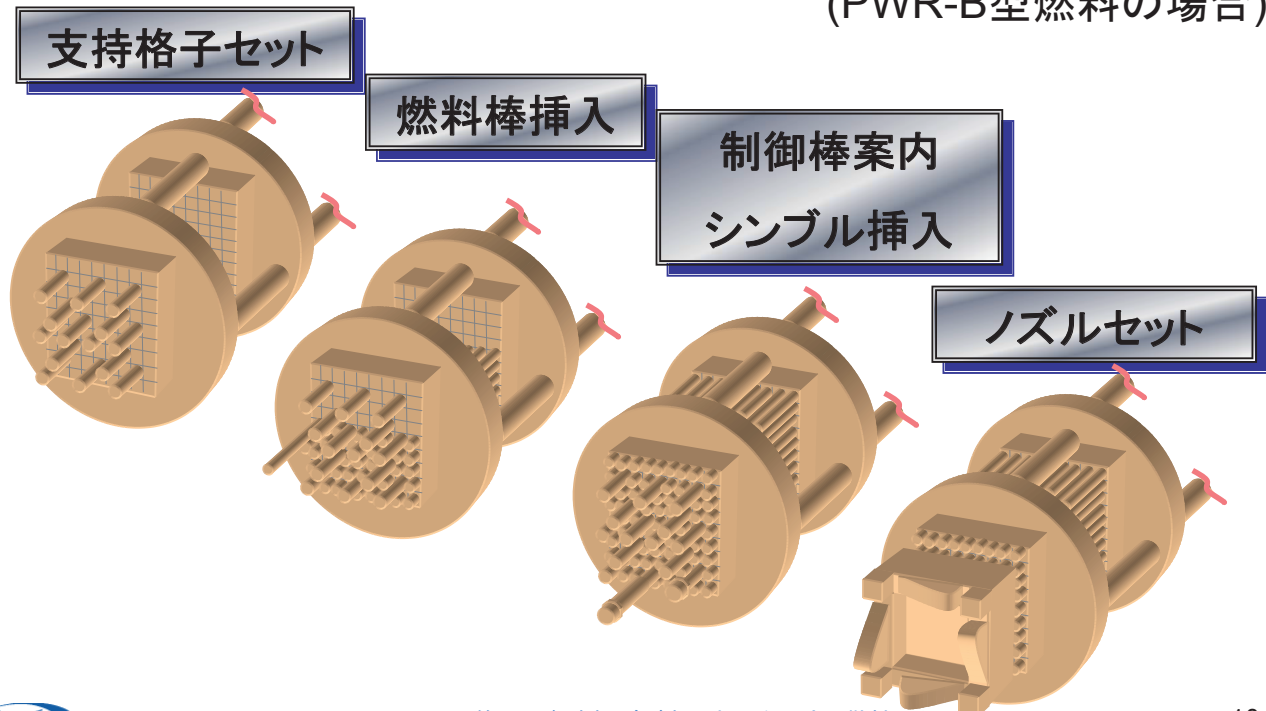
●燃料棒工程



原子燃料の製造プロセス(3/3)

● 集合体組立工程

(PWR-B型燃料の場合)



報告内容

- 原子炉燃料の概要
- トリウム燃料の製造実績
- 加工工場の許認可に関する考察
- まとめ



トリウム燃料の装荷実績とその燃料形態

国	名称	形式	トリウム燃料の形態	出力	期間
ドイツ	AVR	HTGR	(Th,U)O ₂	15MWe	1967-88
	THTR	HTGR	(Th,U)O ₂	300MWe	1985-89
	Lingen	BWR	(Th,Pu)O ₂	60MWe	-1973
イギリス	Dragon	HTGR	(Th,U)C	20MWth	1966-73
	Peach Bottom	HTGR	(Th,U)C ₂ , ThC ₂	40MWe	1966-72
	Fort St. Vrain	HTGR	(Th,U)C ₂ , ThC ₂	330MWe	1976-89
アメリカ	BORAX-IV	BWR	(Th,U)O ₂	2.4MWe	1956-58
	Elk River	BWR	(Th,U)O ₂	24MWe	1963-68
	Shippingport	PWR	ThO ₂ ,U-233含UO ₂	100MWe	1977-82
	Indian Point-1	PWR	(Th,U)O ₂	285MWe	1962-80
オランダ	SUSPOP	水均質スラリー	Th,U	1MWth	1974-77
	KAMINI	NaFR	ThO ₂	30kWe	運転中
	CIRUS	PHWR	(Th,Pu)O ₂	40MWth	運転中
インド	DHRUVA	PHWR	ThO ₂	100MWth	運転中
	Kakrapar-1&2	PHWR	ThO ₂	220MWe	運転中
	FBTR	NaFR	(Pu,U-233含) O ₂	40MWth	運転中

トリウム燃料の化学形態 (装荷燃料製造実績有)

- 酸化物燃料 (ThO₂, (Th,U^{*})O₂, (Th,Pu)O₂)
 - ThO₂は燃料特性が安定
 - 高融点, 高熱伝導度, 低熱膨張率, 低FPGR
 - Th-MOXIはU, Puの比率に応じて燃料特性変化

- 炭化物燃料 ((Th,U^{*})C, ThC₂, (Th,U^{*})C₂)
 - ThCは高重金属含有率, 高熱伝導度, 低熱膨張率
 - ThC₂はHTGR用で周囲炭素による炭化に対して安定

※UはHEU, LEUまたはU-233

トリウム燃料の化学形態(装荷燃料製造実績無)

- 水素化物燃料 [K. Konashi, M. Yamawaki, CIMTEC2010]
 - 水素の減速効果により熱炉で有利
 - 高熱伝導率, 低FPGR
- 窒化物燃料
 - 高重金属密度, 高熱伝導率
 - C-14生成対策のため高濃縮N-15(天然比0.366%)が必要
- 金属燃料
 - 高融点, 低熱膨張, 高熱伝導率
 - Thは広温度範囲でFCCで安定, UやPuは低温相変化があるため, 混合時はZrなどで3元系として安定化
 - 被覆管との低融点共晶の検討が必要

燃料加工で想定される注意点

- トリウム新燃料加工
 - 放射線対策
 - Th-232は微弱 α 線源のため, 作業員の身体汚染, 内部被曝防止策が必要(ウラン燃料と同様)
 - 微量不純物Th-228(半減期1.9年)の γ 線や系列の放射線量評価, 必要に応じて対応が必要
 - 焼結性
 - トリウム化合物の高融点は難焼結性を招く
 - ThO_2 (融点 3350°C)は高密度のためには 2000°C 以上の高温焼結が求められ, 産業化には低温焼結の工夫が必要
 - 焼結助材(Nb_2O_5 , CaO , MgO)条件や新助材の検討
 - 新焼結手法(SPS手法等)の商用規模評価

燃料加工で想定される注意点

●トリウム再処理後燃料加工

- 再処理後の回収ウランの強放射線対応
 - 生成U-233に随伴するPa-232(β 線), U-232・Th-228(トリウム系列の永続平衡核種の γ 線)に対する放射線遮蔽設備, 遠隔操作・自動化が必須
 - 被覆管封入後も遮蔽管理が必要(集合体組立, 検査, 保管, 輸送)
- U-233の臨界管理・核拡散抵抗(保障措置)管理が必須

トリウム酸化物ペレット製造法(1/4)

●粉末ペレット法

- 現行ウラン燃料・MOX燃料加工と同様の工程
- ThO_2 粉末と UO_2 や PuO_2 粉末との混合物は, ボールミル等による機械的粉碎混合が必須
- 焼結助材(Nb_2O_5 , CaO , MgO)を用いる事で焼結温度条件の低下(高密度化)が可能
- インド, 米国, カナダにて実績あり
 - LWR, PHWR, FBR向け
 - 米国; Nuclear Material and Equipment Corp.(NUMEC) およびBettis Atomic Power Lab.にて産業規模で製造
 - インド; Nuclear Fuel Complex(NFC)にて製造
 - カナダ; Recycle Fuel Fabrication Lab.にてPu, U-233, U混合燃料を製造

トリウム酸化物ペレット製造法(2/4)

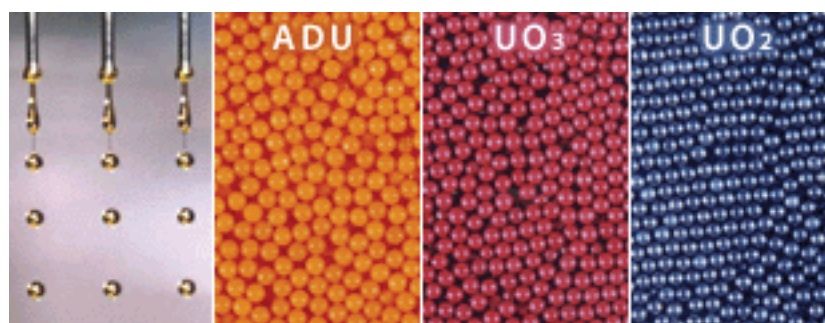
●粉末浸透法

- ThO_2 ペレット(<80%T.D.)を硝酸ウラン溶液または硝酸プルトニウム溶液に浸し, 真空引きによりペレット内に浸透後, 乾燥・焼結
- 自動化・遠隔操作に向くため, 高放射性U-233, Puとの混合物に適す
- 浸透U-233やPuは2~3%で, 高均質ペレットも困難

トリウム酸化物ペレット製造法(3/4)

●ゾル-ゲル粒子製法

- 高温ガス炉用燃料核の製法
- 原料の硝酸溶液をアンモニア中に振動滴下しゲルを生成, 焙焼・焼結で酸化物燃料粒子生成
(NFIのウラン燃料核生成例)



直径0.6mm

トリウム酸化物ペレット製造法(4/4)

● 粒子ペレット法

- ゼル・ゲル粒子製法により製造された微小ゲル粒子を乾燥後プレス成型し焼結
- 湿式で混合された粒子のため、高密度(>98%T.D.)、かつ高均質

● 振動充填法

- 被覆管に粒子を充填し、外部からの振動により高密度化する方法
- 異なった粒径の粒子を適用する事で密度は向上
- B&W, ORNLにて(Th,U-233)O₂の製造実績あり

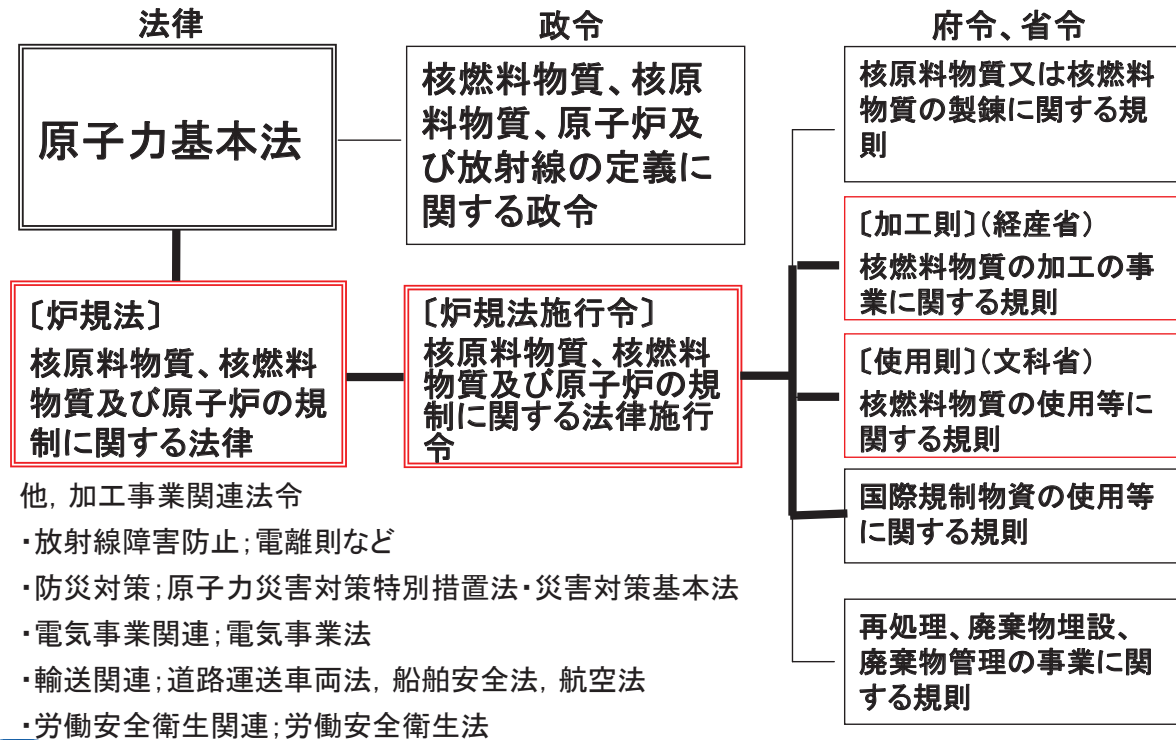
報告内容

- 原子炉燃料の概要
- トリウム燃料の製造実績
- 加工工場の許認可に関する考察
- まとめ



法令(1/5)

● 加工事業関連法令



法令(2/5)

● 原子力基本法

● 第3条(定義)

- 第2号 「核燃料物質」:トリウムが含まれる
- 第3号 「核原料物質」:トリウム鉱が含まれる

● 政令 (核燃料物質, 核原料物質, 原子炉および放射線の定義に関する政令)

● 第1条(核燃料物質)

- 第3号 トリウム及びその化合物
- 第4号 前3号の物質の一又は二以上を含む物質で原子炉において燃料として使用できるもの
- 第7号 ウラン233及びその化合物

● 第2条(核原料物質)

- ウラン若しくはトリウム又はその化合物を含む物質で核燃料物質以外のものとする

法令(3/5)

● 炉規法

- 核原料物質, 核燃料物質及び原子炉に関し, (1)平和利用に限定, (2)計画的利用実施の確保, (3)災害防止と安全確保, を図るため, および国際規制物資に関し, 原子力の研究, 開発及び利用に関する条約, その他の国際約束を実施するための規制
- 規制対象; 精錬・加工・原子炉・貯蔵・再処理・廃棄の事業, 核燃料物質等・国際規制物資の使用等
- 加工事業; 核燃料物質を原子炉に燃料として使用できる形状又は組成とするために, これを物理的又は化学的方法に処理する事業(転換・濃縮・再転換・成型加工)

● 炉規法施行令

- 炉規法の規制範囲の具体的な物質等々の規制

法令(4/5)

● 加工則(経産省令)

- (核燃料サイクル用) 商用の原子炉用の燃料加工事業の許可や設工認等が定められている。
- 基本的には行動基準で管理され, 必要に応じて技術基準(施設規制・物質規制)で管理
 - 核燃料物質の臨界防止
 - 放射線による被曝の防止
 - 主要な加工施設の耐震性
- 臨界・被曝は線量で規制(核種では規制していない)
 - 例外; 第7条の9; (防護措置), 核種量で措置を規制

法令(5/5)

●使用則(文科省令)

- 核燃料物質の使用許可が定められている。
- 適用範囲に、研究炉用燃料の加工の許可、施設の設工認が含まれる。
- 加工の許可や施設の設工認、技術基準は、基本的には加工則と同一である。

当社の現状(1/2)

●加工則(PWR・BWR用燃料)

- 成型・被覆・組立・貯蔵・廃棄等の施設の許可
- 臨界防止
 - 単一ユニット;寸法制限,容積制限,質量制限の設定,未臨界($k_{eff} < 0.95$)を評価確認
 - ユニット配置;干渉を考慮して設定,未臨界評価確認
- 被曝防止(放射線安全)
 - 作業環境,周辺環境の汚染防止設計,モニタリング
 - 工場の放射線遮蔽設計

当社の現状(2/2)

- 使用則 (LWR (研究) 用, HTR 用 燃料)
 - 製造・加工工場・廃棄施設の許可
 - 使用目的が明記され, 使用目的毎に工程・取扱核燃料物質が明記されている
 - LWR 用 燃料; 二酸化ウラン
 - HTR 用 被覆粒子燃料; 二酸化ウラン, **二酸化トリウム** など
 - 濃縮ウランは 5~10% も 許可
 - 臨界防止・被曝防止は加工則と同一

許認可に関する考察

- 至近研究の取扱
 - 使用則に基づき, 使用目的を明確にしたうえでトリウムの使用許可申請を行う
- 軽水炉や高速炉の燃料事業としての取扱
 - 加工則に基づき, 事業許可申請を行う
 - 臨界評価・防護措置; トリウムだけを扱う施設であれば, 法令上も対応は不要だが, ウランやプルトニウムと共に取扱うのであれば必須
 - 被曝評価; 粉末中の不純物を考慮した評価を行い, 作業環境, 周辺環境の汚染防止設計および遮蔽設計が必須
 - その他は現行許可からの変更は無い。

報告内容

- 原子炉燃料の概要
- トリウム燃料の製造実績
- 加工工場の許認可に関する考察
- まとめ



まとめ

- トリウム燃料の製造について、製造実績を調査し、加工許認可について考察を行った。
 - 燃料製造に関しては、現行の商用加工方法であるペレット法が有望であるが、産業規模の製造のためにはペレット密度向上に関する研究が必要
 - 現行の加工工場に対し、トリウムの許可を申請する場合は、適切な遮蔽評価、設計が必要
 - 再処理後加工に関しては、臨界評価、遮蔽評価、核防護対策が必要
- 使用目的の明確化、使用許可取得のうえでFSを実施し、実現性を見極める事が第一歩



ご清聴ありがとうございました。

