茨城大学
Ibaraki University

第14回核融合エネルギー連合講演会
核融合エネルギー産業の創出に向けて
2022.7.7-7.8

シンポジウム2-5
原型炉研究開発の課題と取り組み

原型炉におけるトリチウムの課題と取り組み

茨城大学 大学院 理工学研究科

鳥 養 祐 二

トリチウム諸課題検討WG

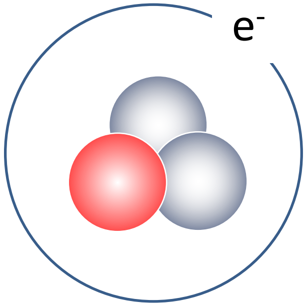
トリチウム諸課題検討WGの班構成

✓環境トリチウム規制目標	鳥養
✓トリチウム燃料サイクル	岩井
✓大量トリチウム取扱施設	岩井
✓初期装荷トリチウム調達	松浦
✓インベントリ評価	染谷

本日の内容

1. トリチウムに関わる法規制
2. 原子力施設からのトリチウムの放出
3. 福島第一原子力発電所で生じたトリチウム処理水
4. DEMOにおけるトリチウムの放出

5. 時間があれば、魚中のトリチウム濃度の迅速測定法の紹介



放射性同位元素等規制法におけるトリチウム

告示(放射線を放出する同位元素の数量等を定める件):別表第1

核種	数量(Bq)	濃度(Bq/g)
^{3}H	1×10^{9}	1×10^{6}

告示(放射線を放出する同位元素の数量等を定める件):別表第2

化学型など	吸入摂取した場合の実効線量係数 (mSv/Bq)	経口摂取した場合の実効線量係数 (mSv/Bq)	空気中濃度限度 (Bq/cm³)	排気中又は空気中の濃度限度 (Bq/cm³)	廃液中又は排水中の濃度限度 (Bq/cm³)
元素状水素	**1.8×10^{-12}**		1×10^{4}	7×10^{1}	
メタン	1.8×10^{-10}		1×10^{2}	7×10^{-1}	
水	**1.8×10^{-8}**	**1.8×10^{-8}**	**8×10^{-1}**	**5×10^{-3}**	**6×10^{1}**
有機物(メタンを除く)	4.1×10^{-8}	4.2×10^{-8}	5×10^{-1}	3×10^{-3}	2×10^{1}
上記を除く化合物	2.8×10^{-8}	1.9×10^{-8}	7×10^{-1}	3×10^{-3}	4×10^{3}

原子炉規制法におけるトリチウム

排気口又は排気監視設備において排気中の放射性物質の濃度を監視することにより周辺監視区域の外の空気中の放射性物質濃度が原子力規制委員会の定める濃度限度を超えないようにすること	
水蒸気状	5 Bq/L
水素ガス	70,000 Bq/L

排水口又は排水監視設備において排水中の放射性物質の濃度を監視することにより、周辺監視区域の外側の境界における水中の放射性物質の濃度が原子力規制委員会の定める濃度限度を超えないようにすること	
水中の濃度	60,000 Bq/L

実用発電用原子炉の設置、運転等に関する規則の規定に基づく線量限度等を定める告示

- 「外部被ばくによる１年間の実効線量の1mSvに対する割合」、「空気中の各放射性物質の各濃度限度に対する割合の和」及び「水中の各放射性物質の各濃度限度に対する割合の和」の和が１未満となること

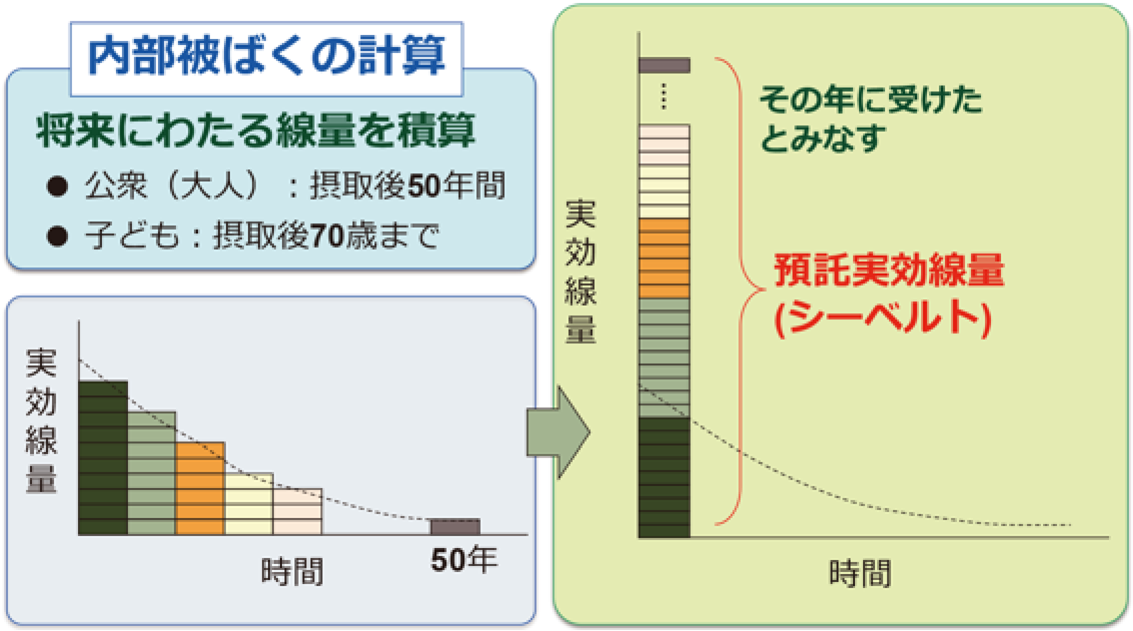
トリチウムによる内部被ばく線量の計算

内部被曝した場合は、預託線量という考え方で被曝線量を計算します。

預託実効線量(mSv)＝実効線量係数(mSv/Bq)×年間の核種摂取量(Bq)

- ✓ トリチウム(水)の実効線量係数：1.8×10^{-8} mSv/Bq
- ✓ トリチウム(有機物)の実効線量係数：4.2×10^{-8} mSv/Bq

放射性物質を一回だけ摂取した場合に、それ以後の生涯にどれだけの放射線を被ばくすることになるかを推定した被ばく線量



(出典：環境省 放射性物質対策)

- ➢ 0.5 Bq/Lの水を一年間飲み続けた場合

  0.5 Bq/L×1.65 L/日×365 日
  ×1.8×10^{-8} mSv/Bq
  = 5.4×10^{-6} mSv = 5.4 nSv

- ➢ 1 GBqのトリチウムを含む時計を間違って食べた場合

  1×10^{9} Bq×5.2×10^{-8} mSv/Bq
  = 42mSv

トリチウム濃度と年間被曝線量(食品＋水)

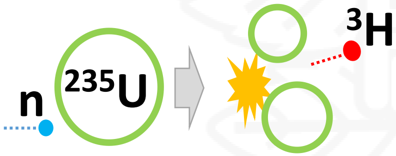
	トリチウム濃度 (Bq / L)	この水を1年間摂取し続けた時の年間被曝線量* (mSv / 年)
マウスを用いた実験で、発がん頻度が自然発生と同程度であったトリチウム濃度。これ以上の濃度での実験では、発がん頻度が上昇。	139,000,000	2,055
オーストラリアの飲料水中のトリチウムの濃度限度	76,103	1.17
ICRPがこの濃度未満であれば人体に問題ないとする濃度	60,000	0.89
管理区域・原子力施設からの排水基準	60,000	0.89
WHOの飲料水のガイドライン	10,000	0.15
カナダの飲料水中のトリチウムの濃度限度	7,000	0.10
東京電力が海洋放出を検討している濃度	1,500	0.02
飲料水の連邦基準(USA)	740	0.011
核実験当時の降水中のトリチウム濃度	110	0.0016
ヨーロッパ(EU)の飲料水中のトリチウムの濃度限度	100	0.0015
現在の降水中のトリチウム濃度	0.5	0.0000074
海水中のトリチウム濃度	0.1	0.0000015

＊年間被曝線量は、1日に2.25Lの水(水として1.65L、その他の食品から0.6L)を摂取するとして計算

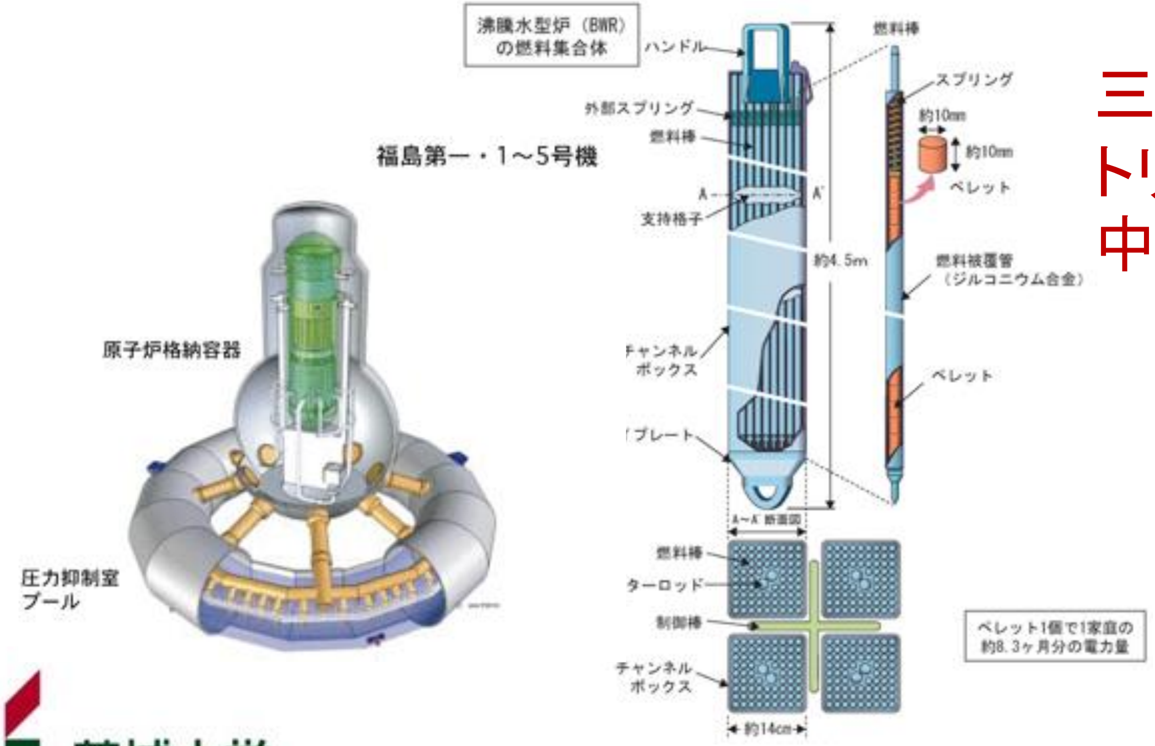
茨城大学 Ibaraki University
大学院理工学研究科　鳥養祐二

原子炉におけるトリチウムの生成

- ^{235}Uの三体核分裂



- 制御棒中ホウ素(B)と中性子の反応　^{10}B (n,2〈) ^{3}H
- 重水素(D)と中性子との反応　^{2}H (n,©) ^{3}H



三体核分裂により生成したトリチウムは、通常は燃料中に閉じ込められます。

原子力施設におけるトリチウムの管理

原子力施設では、放出の管理目標値を保安規程に定めて管理を行っている。

- 被ばく線量の合計値（気体及び液体の合計）が法令で定める線量限度である年間1mSvを下回ること。さらに「発電用軽水炉型原子炉施設周辺の線量目標値に関する指針」に記載の努力目標値である年間50μSvに対しても評価する。

六ヶ所村再処理工場	
大気中への放出管理目標値	1.9×10^{15} Bq／年 (約5g/y)
海洋中への放出管理目標値	1.8×10^{16} Bq／年 (約50g/y)

東海再処理施設	
海洋中への放出管理目標値	1.9×10^{15} Bq／年 (約5g/y)

東京電力福島第一原子力発電所	
保安規程(事故前)	2.2×10^{13} Bq／年(22兆Bq)

出典：原子力施設に係る平成28年度放射線管理等報告
(原子力規制庁)

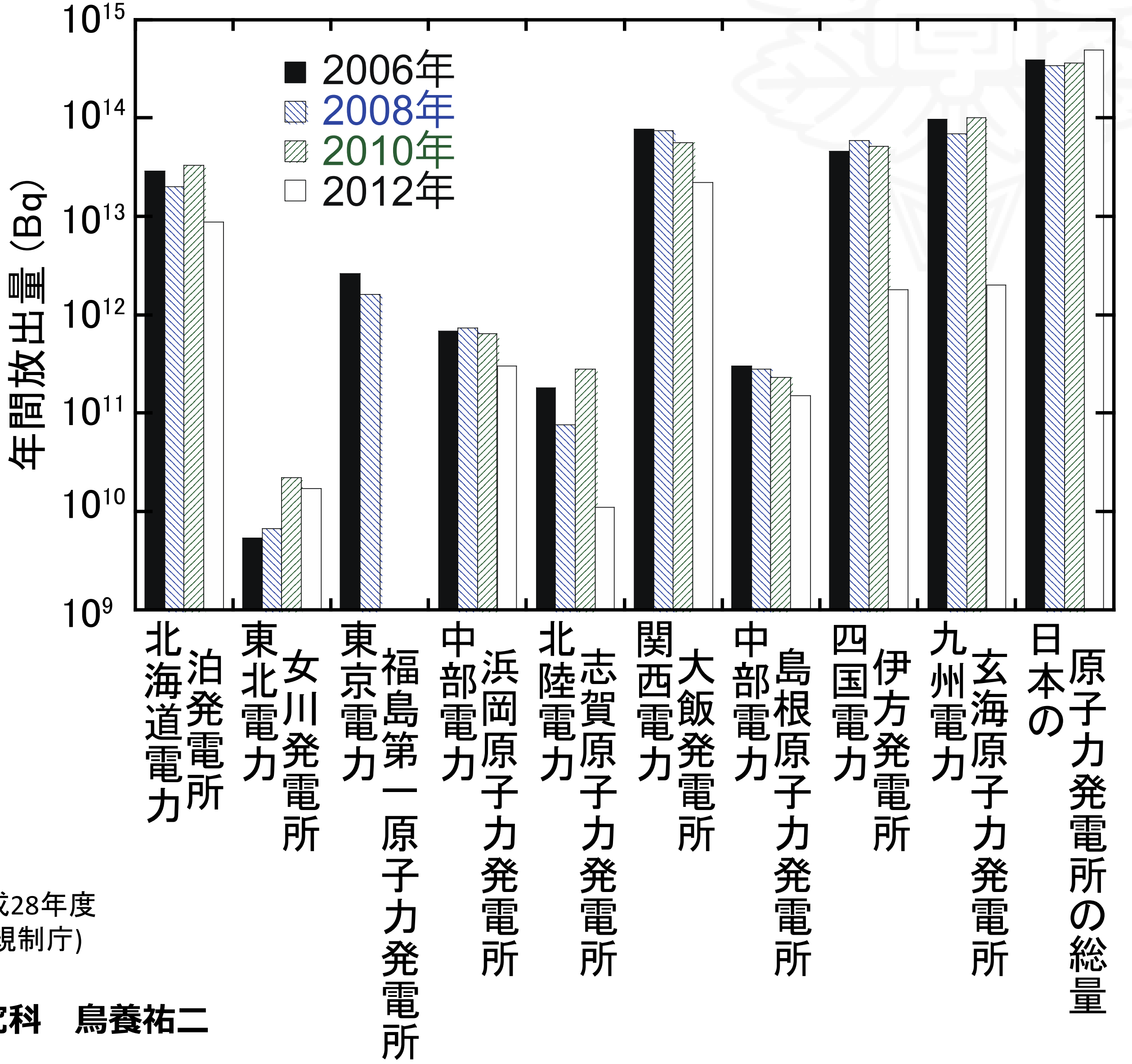
原子力施設からの実際のトリチウムの放出

実際には、管理目標値の1/10ぐらいを放出

トリチウム生成量
　加圧水型＞沸騰水型

放出量は発電所の種類と設置基数により異なり、1発電所あたり、
　10^8 Bq (数十μg-T_2)
　　～　10^{14} Bq (0.5 g-T_2)

全ての原子力発電所からの年間の放出量は、
3.9×10^{14} Bq(1.1g-T_2)



出典：原子力施設に係る平成28年度放射線管理等報告 (原子力規制庁)

福島第一原子力発電所の事故で放出したトリチウム

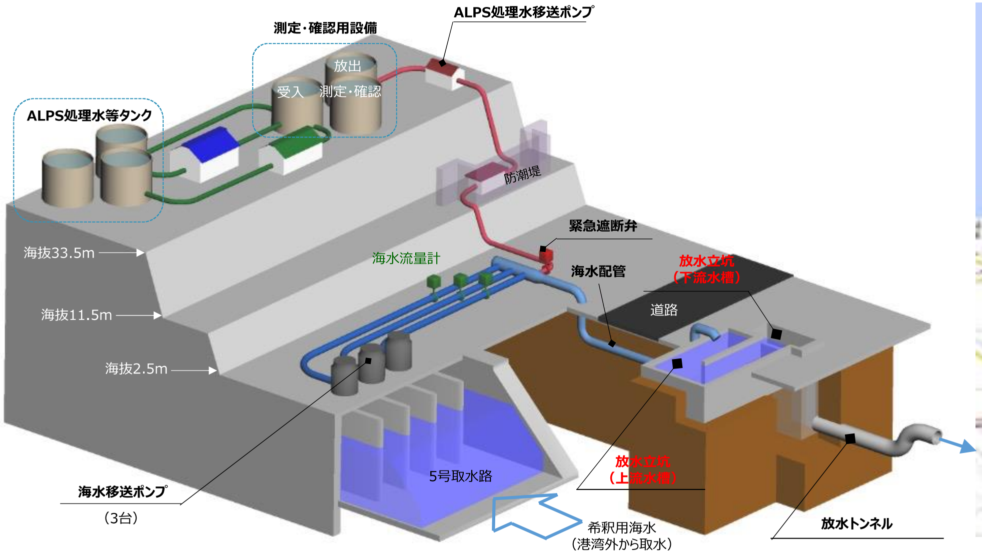
- ■ 福島第一原子力発電所では、1号機から3号機中に最大3,400兆Bq ($3.4x10^{15}$ Bq, 約9 g) のトリチウムが存在していた。
- ➢ 処理水中で確認されたトリチウムの最大濃度は、4,000,000 Bq/L。
- ➢ 現在は、新規に発生する処理水中のトリチウム濃度が減少し、300,000 Bq/Lぐらい。
- ➢ トリチウム処理水の総量は約125万トン。平均濃度は620,000Bq/L。
- ➢ 処理水中には約780兆 Bq (T_2Oとして8 g、T_2として2.2 g)ぐらいのトリチウムが存在

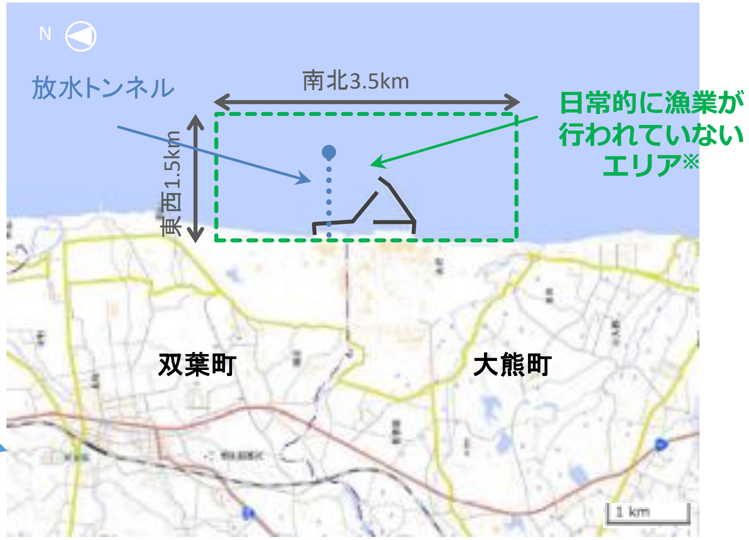
(2021年4月1日時点)

(出典：東電資料、タスクフォース資料)

東京電力のトリチウム処理水の処分計画

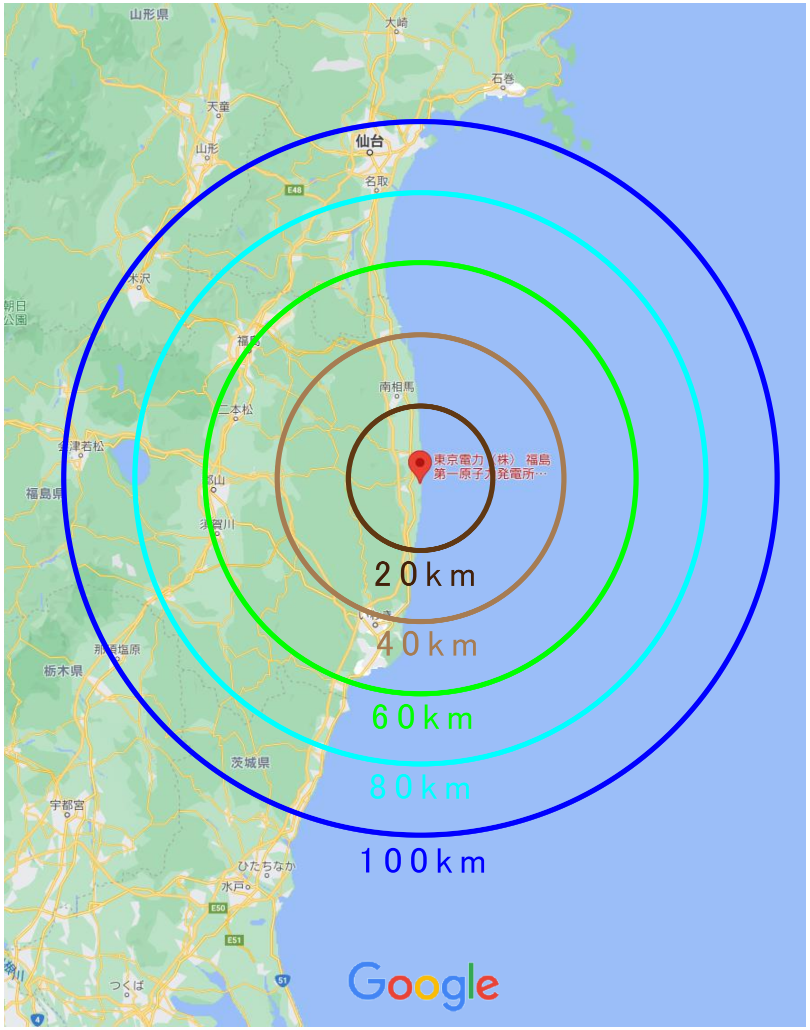
- 放出するALPS処理水は、トリチウム以外の62核種および炭素14の告示濃度比総和が1未満となるまで浄化したもの。
- トリチウムの年間放出量は、事故前の福島第一原子力発電所の放出管理目標値である22兆Bq未満とする。
- 放出にあたっては、海水により100倍以上に希釈し、排出口でのトリチウム濃度を1,500Bq/L未満とする。
- 希釈後のALPS処理水は、発電所沖合約1kmの海底より放出する。





(出典:東京電力資料)

海洋放出時にトリチウムは検出されるか？



✓ トリチウム処理水は1,500 Bq /L以下の濃度で海洋放出を予定しています。

→ トリチウムは環境中にたくさん存在するので、海水により2,000倍に希釈されたら環境中のトリチウムと区別ができなくなります。

✓ 平均濃度620,000Bq/Lのトリチウム処理水を、1日500ton処理すると仮定すると、1日あたりの排水量は21万tonです。

- 平均の水深が20mとすると、
  - 21万トン：100m × 100m × 20m
  - 21万トン × 2,000：4.6km × 4.6km × 20m

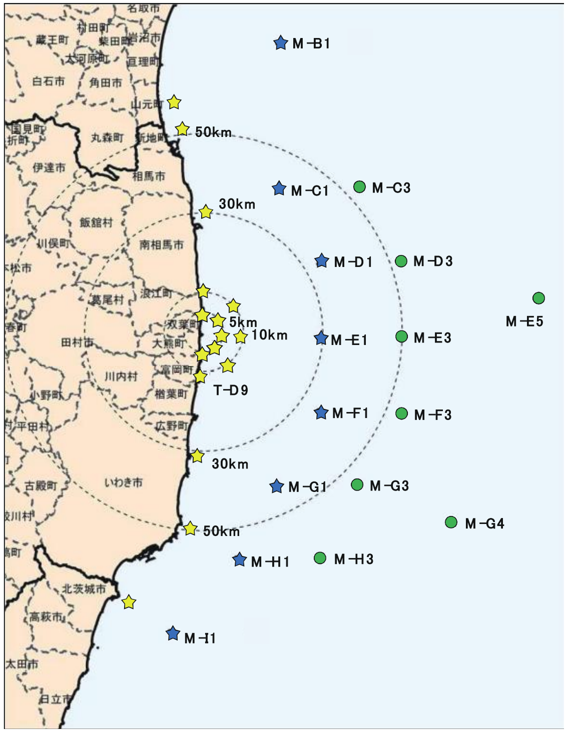
海水の希釈効果は非常に大きいので、放出口付近から数キロメートルも離れれば検出は非常に困難です。

トリチウム処理水の海洋放出処分の現状

- 2021年4月：トリチウム処理水を海洋放出処分することを閣議決定

- 2022年4月：環境省が総合モニタリング計画を改定して、トリチウム処理水に関わるモニタリング計画を策定

- 2022年6月：第1回事前モニタリングが行われた。
  - 海水
    - ✓ トリチウム：54カ所、月1回 or 年4回
    - ✓ 主要7核種：3カ所、年4回
    - ✓ 62核種＋^{14}C：3カ所、年4回
  - 水生生物
    - ✓ トリチウム：3カ所、年4回



海洋放出処分の問題点

- 海水、海生生物(魚)中のトリチウム濃度測定に非常に時間がかかる。

海水

試料採取	ろ過	蒸留	電解濃縮	蒸留	一昼夜放置	LSC測定
	～10分	数時間	5日	数時間	1日	1日

1ヶ月で10試料程度しか測定できない。

魚

試料採取	凍結乾燥	蒸留	電解濃縮	蒸留	一昼夜放置	LSC測定
	2週間	数時間	5日	数時間	1日	1日

自由水の測定だけでも1ヶ月弱の時間が必要である。

- 飲料水および食品中のトリチウム濃度基準が決まっていない。

茨城大学 Ibaraki University
大学院理工学研究科　鳥養祐二

海洋放出処分の分かりにくい点

- トリチウムはどうやって処分するの？(海洋放出の目的)
  - ✓ トリチウムを海洋放出により処分すると言っていますが、トリチウムのほとんどは β^-壊変によって減少します。海洋放出の目的は、廃炉作業に必要な敷地確保のためです。
- なぜ、1,500 Bq/Lで海洋放出するの？
  - ✓ 他の放射性核種が含まれているために1,500 Bq/Lで海洋放出すると言われていますが、そのようなことはありません。他の核種は、多核種除去装置(ALPS)での処理により十分に除染されます。
- トリチウムの排出量は多くなったの？
  - ✓ 3.11の前と比較して、トリチウムの年間の海洋放出量に違いはありません。

＊3.11の前後で、放出量とその濃度に大きな違いはありません。

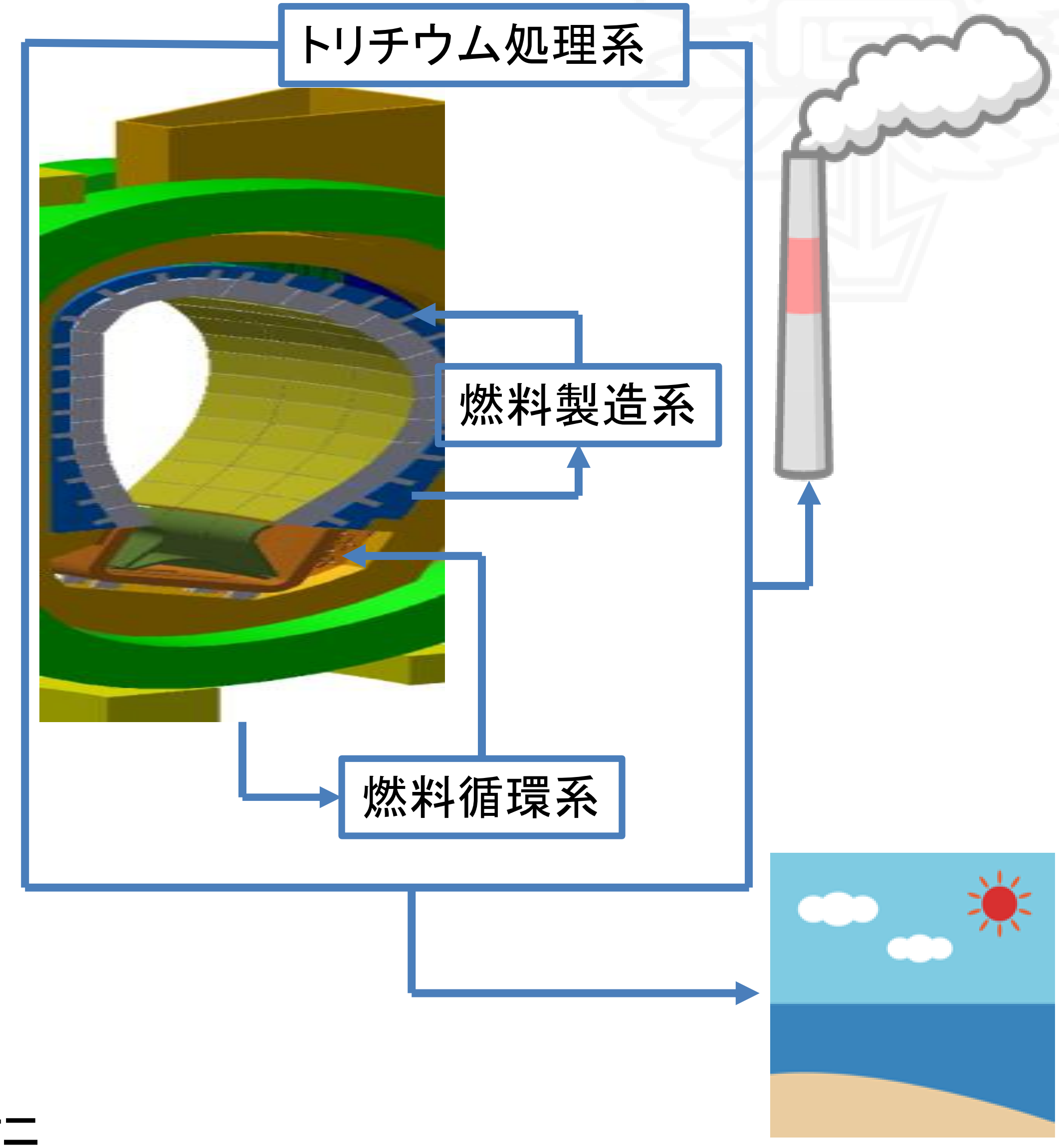
- 海洋放出の何が問題なの？
  - ✓ 風評被害が問題です。福島県を始め関係する人々は風評被害が問題と言っています。
  - ✓ 事故を起こした東京電力への信頼性の問題です。

DEMOにおけるトリチウムの放出

- 定常運転時のトリチウムの放出量は、年間1g以下を予測している。
（冷却水への透過がほとんど）
- メンテナンス時や事故時については、今後に検討する。

- 原子炉と同様に管理目標値を設定する必要があると思われるが、管理目標値は事故を想定して設定する必要がある。

➢ 事故が起きたときに被ばく線量としては大丈夫でも、環境トリチウム濃度を大きく上げる予測になる。



DEMOと世界の原子力施設からのトリチウムの放出量の比較

- フランス ラ･アーグ再処理施設(2015年):
  約1.37×10^{16} Bq(38g−T_2)
- イギリス セラフィールド再処理施設(2015年):
  約1.54×10^{15} Bq(4.3g−T_2)
- 日本の全ての原子力発電所:　約3.9×10^{14} Bq(1.1g−T_2)
- DEMO (定常運転時):　約3.6×10^{14} Bq(1g−T_2)以下
- カナダ ダーリントン原子力発電所(2015年):
  約2.4×10^{14} Bq(0.67g−T_2)
- 福島第一原子力発電所の排水計画の年間最大量:
  最大2.2×10^{13} Bq(0.063g−T_2)

まとめ

1. 排水中のトリチウムの濃度限度は60 Bq/cm^3
2. 原子力施設では、放出の管理目標値(50 μSv)を保安規程に定めて管理。
3. トリチウム処理水の海洋放出処分は、社会的な合意が得られているとは言いがたい。
4. DEMOは定常運転時は年間1 g以下の環境放出を予定。
5. 世界の原子力施設からは大量のトリチウムが海洋放出されている。定常運転時の排出量は、それらと比較して十分に少ない。

- 社会的信頼性がなければ核融合の実現は難しくなるので、関係者は気を緩めることなく精進する必要がある。

マイクロ波加熱法による魚の自由水の迅速な回収

自由水の回収に15～30分程度

マイクロ波加熱法は、身近にある物だけで魚の自由水を回収することができる。

→2022年秋の原子力学会で詳細を報告予定

茨城大学
Ibaraki University
大学院理工学研究科　鳥養祐二

有機結合型トリチウム(OBT)濃度について

	トリチウム濃度 (Bq / kg)	この食品を1年間摂取し続けた時の年間被曝線量* (mSv / 年)
WHOの飲料水のガイドライン	10,000	0.15
国際連合食料農業機関(FAO)及び世界保健機関(WHO)による、「食品及び飼料中の汚染物質及び毒素に関するコーデックス一般規格（CODEX STAN 193-1995）」乳児用食品以外の食品(有機結合したトリチウム)	10,000	0.02
東京電力が海洋放出を検討している濃度	1,500	0.02
国際連合食料農業機関(FAO)及び世界保健機関(WHO)による、「食品及び飼料中の汚染物質及び毒素に関するコーデックス一般規格（CODEX STAN 193-1995）」乳児用食品(有機結合したトリチウム)	1,000	0.002
ヨーロッパ(EU)の飲料水中のトリチウムの濃度限度	100	0.0015
放射性セシウムの基準値 一般食品 (厚生労働省)	100	0.07
放射性セシウムの基準値　乳幼児 (厚生労働省)	50	0.02
現在の降水中のトリチウム濃度	0.5	0.0000074
海水中のトリチウム濃度	0.1	0.0000015