

那珂核融合研究所における放射性同位元素等の許可使用に係わる変更の許可申請について

令和2年4月

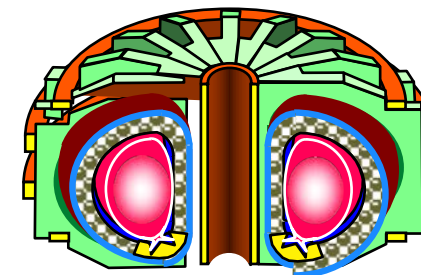
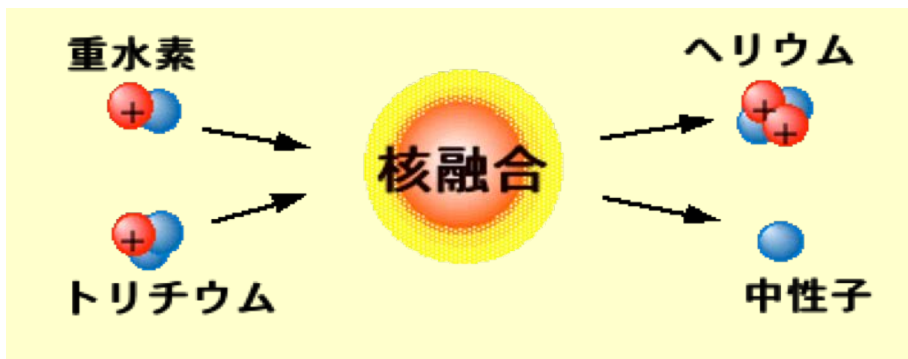
国立研究開発法人
量子科学技術研究開発機構
核融合エネルギー部門
那珂核融合研究所

1. 那珂核融合研究所におけるプラズマ発生装置について	
1-1 核融合炉の特徴	..... 3
1-2 核融合エネルギー実用化への道	..... 4
1-3 プラズマ発生装置(JT-60)の成果	..... 5
1-4 JT-60SA計画の目標	..... 6
1-5 JT-60SA組立	..... 7
2. プラズマ発生装置運転再開における変更申請の概要	
2-1 プラズマ発生装置の変更申請内容	..... 8
2-2 放射性同位元素等使用許可証(抜粋)	..... 9
2-3 プラズマ発生装置JT-60とJT-60SAのパラメータ	..... 10
2-4 プラズマ発生装置の中性子発生量	..... 11
2-5 プラズマ発生装置の変更箇所-1	..... 12
プラズマ発生装置の変更箇所-2	..... 13
プラズマ発生装置の変更箇所-2-1	..... 14
プラズマ発生装置の変更箇所-2-2	..... 15
2-6 非密封RI及び密封RIの変更箇所-1	..... 16
非密封RI及び密封RIの変更箇所-2	..... 17
2-7 プラズマ発生装置の運転及び申請スケジュール	..... 18
3. 放射性同位元素等規制法に対する適合性評価	
3-1 放射性同位元素等規制法等に基づく評価項目	..... 19
3-2 プラズマ発生装置の実効線量評価方法(JT-60とJT-60SA)	..... 20
3-3 プラズマ発生装置(JT-60及びJT-60SA)の中性子輸送計算モデル及び線源条件	..... 21
3-4 プラズマ発生装置のJT-60実験棟本体室・組立室の実効線量	..... 22
3-5 プラズマ発生装置貫通口からの中性子漏洩計算	..... 23
3-6 プラズマ発生装置運転時の管理区域境界の実効線量	..... 24
3-7 プラズマ発生装置運転時の事業所境界の実効線量	..... 25
3-8 プラズマ発生装置運転時の排気中放射性同位元素濃度	..... 26
3-9 非密封RIに係る実効線量及び濃度-1	..... 27
非密封RIに係る実効線量及び濃度-2	..... 28
3-10 密封RIに係る実効線量	..... 29
3-11 総合評価(事業所境界合算)	..... 30
4. まとめ	..... 31

1-1 核融合炉の特徴

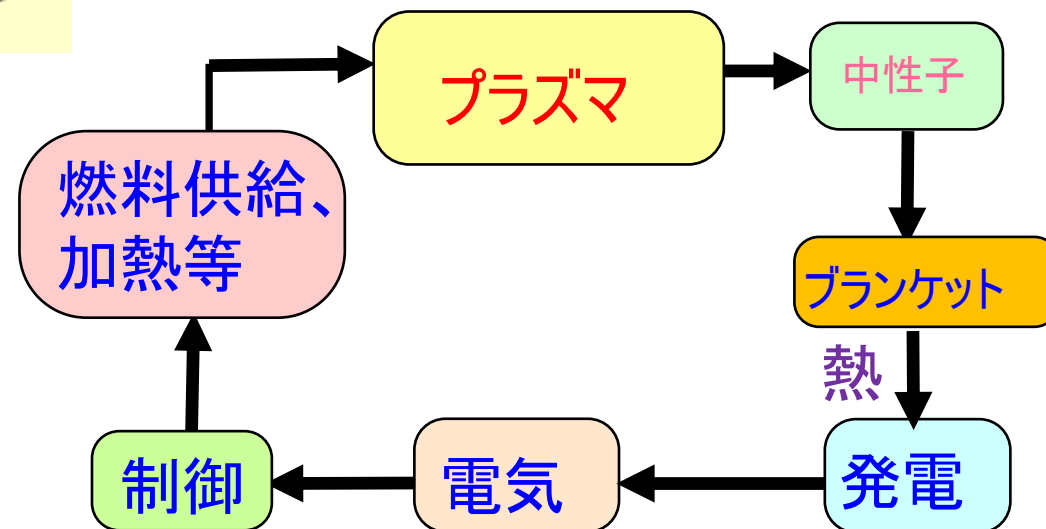
核融合炉の安全上の特徴：すぐ停止

単独反応の繰返し



軽い原子核同士が融合してエネルギーを発生

- ・前の反応は次の反応と関係しない
- ・その時に必要な量しか炉内にない
- ・外から絶えず燃料を入れる
それを止めれば反応は止まる



- 高圧カプラズマを綿密な制御で維持して反応を維持。
→ スイッチオフで簡単に停止

試験装置

実験炉
現在

原型炉

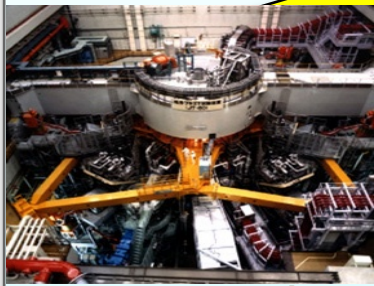
今世紀半ば

核融合燃焼を起こし持続させる研究開発

JT-60計画

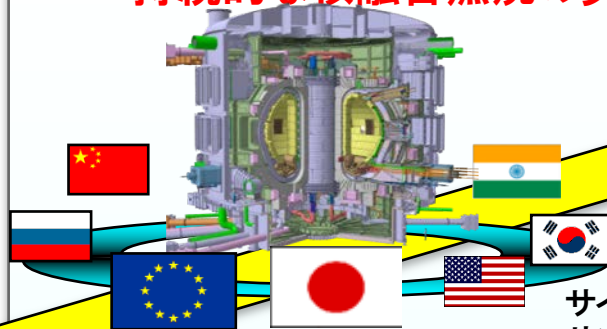
超高温プラズマの
実現 (1990年代)

世界最高のエネルギー増倍率
1.25(実燃料換算値)
世界最高イオン温度
5.2億度



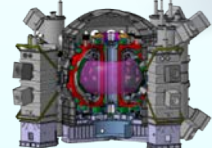
【那珂核融合研究所】

国際熱核融合実験炉ITER
持続的な核融合燃焼の実証 50万kW



サイト: フランス
サン・ポール・レ・デュランス市
(カダラッシュ)

ITERを支援する
JT-60SA計画
【那珂核融合研究所】



ITERで
できないことを補う

ITERを利用する

核融合原型炉

発電実証
経済性が見通し

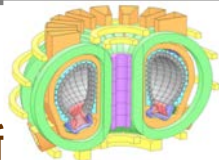


実用化に見通し

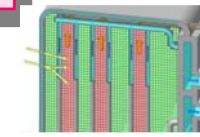
核融合燃焼を活用する研究開発

原型炉設計

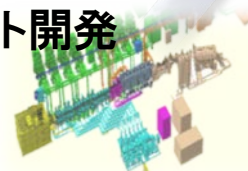
【六ヶ所核融合研究所】



ブランケット開発



構成材料の開発

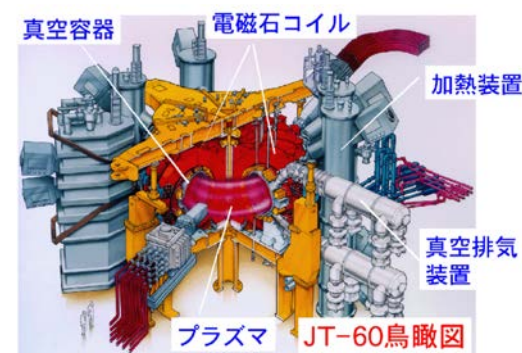
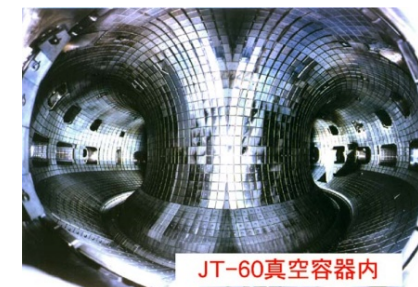
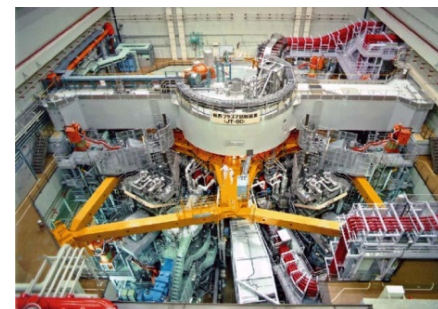


核融合中性子照射
試験施設の開発

日欧共同事業
「核融合エネルギー研究分野における幅広いアプローチ(BA)活動」も活用して実施

原子力委員会が定めた第2段階核融合研究開発基本計画の中核装置

- 1979年 : 建設開始
- 1985年 : 運転開始
- 1992年～ : 第3段階核融合研究開発基本計画に従い実験炉以外のトカマク装置として、実験炉では十分解明できない炉心プラズマ技術分野の研究開発を実施。
- 1996年 : **臨界プラズマ条件達成**
- 1997年 : **世界最高エネルギー増倍率**
- 2008年8月 : 実験完遂



実験炉を補完し、定常高ベータプラズマ実験に向けた先進的炉心プラズマ制御技術の研究開発を行うサテライトトカマク計画 (**JT-60SA計画**) を日欧の国際協力のもとで進めている。

障防法※申請と施設検査

- 1989年7月 : 障防法※使用許可申請 (プラズマ発生装置)
- 1991年7月 : JT-60施設整備完了、重水素実験開始
- 1993年8月 : JT-60施設検査を完了 (合格)

1991年以降、**5年毎の定期検査で法令に対する適合性を確認**。必要に応じて随時変更申請実施。

※: 障防法 (現在は、放射性同位元素等規制法)

1989年	1990年	1991年	1992年	1993年
許可申請		—	施設検査	合格証
		重水素実験開始		5.6 (世界第1位)
	JT-60改造・重水素化対策	1.3	2.8	DD中性子発生率 (10 ¹⁶ 個/秒)

1-4 JT-60SA計画の目標

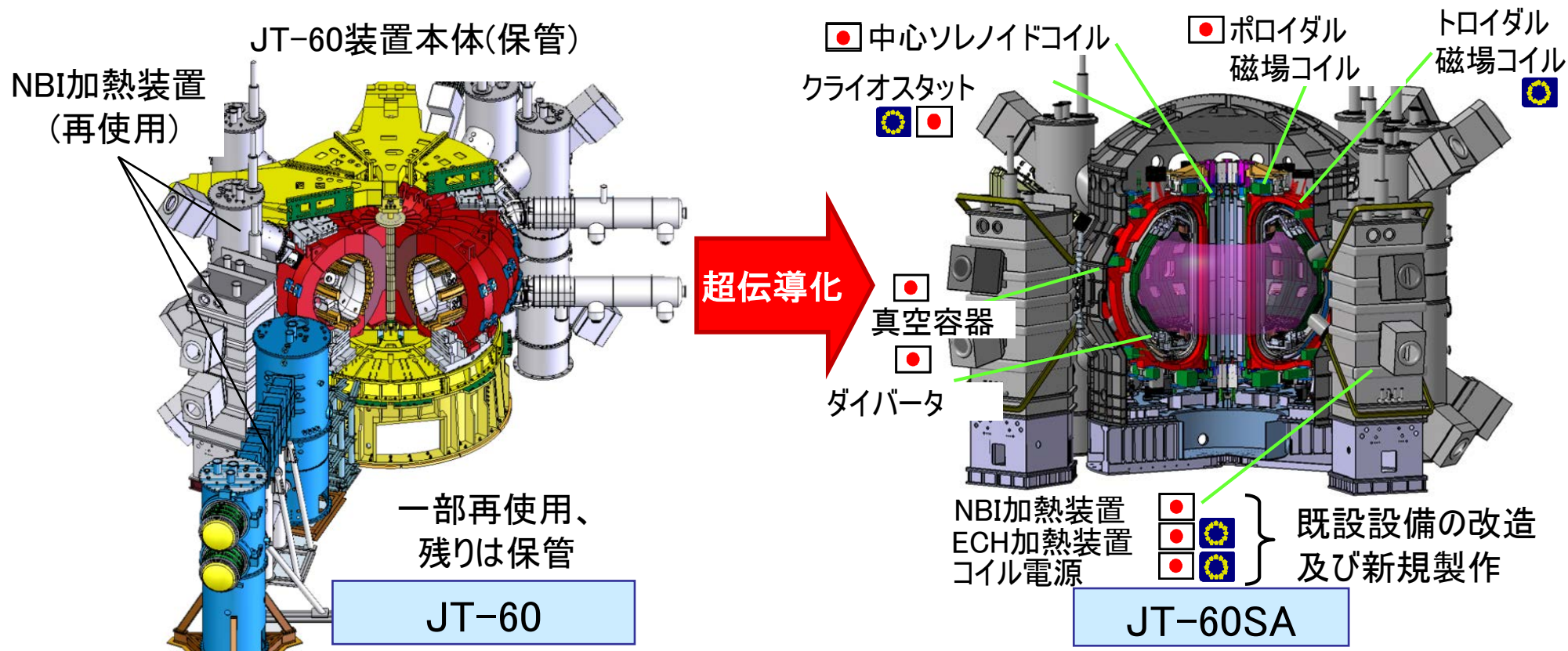
日欧協力で実施する幅広いアプローチ(BA)活動のサテライト・トカマク計画(JT-60SA)として、**JT-60を超伝導トカマク装置に改修**(以降JT-60SAと呼ぶ。)

目標

- 核融合熱出力50万kWを出すITERの目標達成のための支援研究
- 核融合原型炉のためにITERでできない挑戦的な研究

特徴

- JT-60SA本体、加熱装置、コイル電源設備等を日欧で分担して製作
- 既存の建屋やユーティリティー等(電源の一部、冷却系)を**再利用**



上側平衡磁場
コイルと中心ソレノイド*



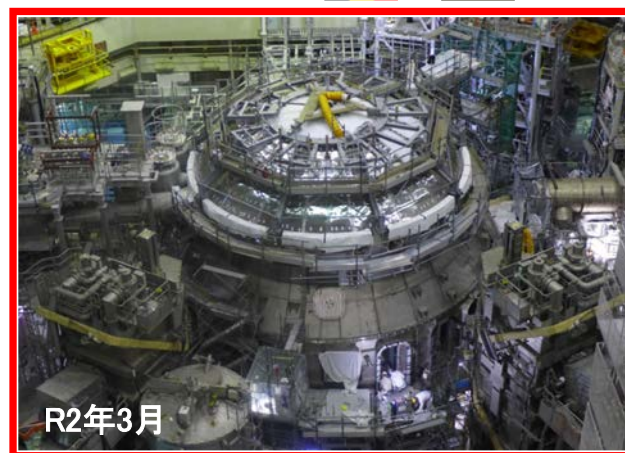
クライオスタット ベース
 下側平衡磁場 コイル
 真空容器
 真空容器 サーマルシールド
 TFコイル
 クライオスタット

TFコイル
試験施設



TFコイル

高温超伝導
電流リード



R2年3月



初プラズマ R2年

クエンチ
保護回路

電源
電動発電機

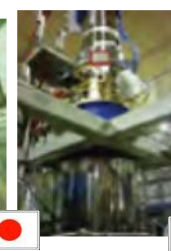
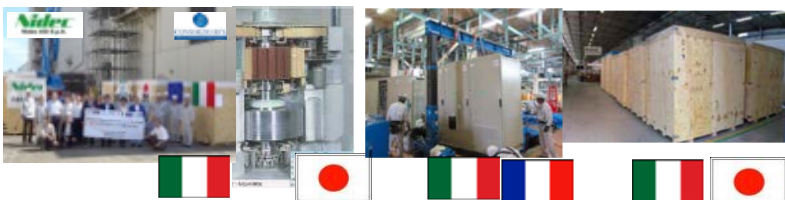
超伝導コイル用電源

冷凍機システム

NBI

ECH

計測機器等



今回の主な改造は、JT-60実験棟内に設置される**JT-60装置本体**であり、**建屋や設備は、再使用する**。

那珂核融合研究所における放射性同位元素等規制法対象施設等

- ・放射線発生装置
 プラズマ発生装置
- ・密封されていない放射性同位元素
 第一壁タイルの分析等 (^3H 含む20核種)
- ・密封された放射性同位元素
 中性子検出器の校正用線源 (^{252}Cf)

本申請における変更内容

1. 放射線発生装置
 - 1.1 プラズマ発生装置
 - ・プラズマ発生装置の運転再開
 - 1.2 使用施設
 - ・管理区域の設定(運転休止前に戻す、または新設)
 - ・貫通口の変更(遮蔽の新設、または改修)
2. 密封されていない放射性同位元素
(以下「非密封RI」)
 - ・放射性同位元素の使用数量及び貯蔵能力の変更
3. 密封された放射性同位元素(以下「密封RI」)
 - ・使用場所及び使用の方法の変更

プラズマ発生装置は、現在休止中であり、許可証には以下のように記載されている。令和5年の重水素によるプラズマ発生装置の運転再開に向けて変更申請を実施中。

許可(承認)条件

・プラズマ発生装置については、改造期間中に限り登録検査機関の定期検査・定期確認を受けなくてもよい。ただし、プラズマ発生装置の運転再開に際しては、登録検査機関の施設検査を受け、これに合格した後でなければプラズマ発生装置を使用してはならない。

記事

プラズマ発生装置について

・プラズマ発生装置は、平成30年度末(予定)まで運転休止し、その間、高温プラズマを閉じこめる容器や磁場コイル等を中心に改造を行う。

改修期間中は、高温プラズマを閉じこめる容器に燃料を供給する装置やプラズマを高温まで加熱する装置及び一部の遮蔽体等は、一旦撤去されるので、プラズマ発生装置は運転できない。

使用方法について

3. 放射線発生装置について

・プラズマ発生装置の使用方法は、以下の通りとする。

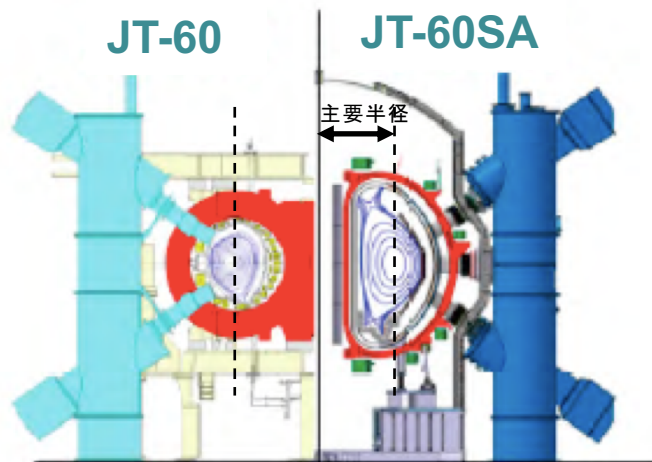
・重水素ガスをNBI加熱装置及びICRF加熱装置により加熱して高温プラズマを発生させる。

・最大DD核融合熱出力: 3.6MJ/週、24.7MJ/3月、37.2MJ/年

・最大中性子発生量 : 3.1×10^{18} 個/週、 2.1×10^{19} 個/3月、 3.2×10^{19} 個/年

・最大加熱入力 : 54MW

2-3 プラズマ発生装置JT-60とJT-60SAのパラメータ



主要パラメーター	JT-60	JT-60SA	
		実験運転-1	実験運転-2
最大閉じ込め磁場	4 T	2.25 T	
最大プラズマ電流	7 MA	5.5 MA	
プラズマ主要半径	3.4 m	~3 m	
プラズマ小半径	1.1 m × 1.5 m	~1.2 m × ~2.3 m	
最大加熱入力 及びユニット数	54 MW (正イオン源:14 負イオン源:2)	23.5MW (正イオン源:8 負イオン源:2)	37 MW* (正イオン源:12 負イオン源2)
最大加熱入力のパルス幅	10秒	~100秒	~100秒

※研究の進展により、最大41 MWまで増加の可能性有り。

JT-60SAでは、プラズマの生成時間を従来の10秒から100秒まで伸長して、プラズマ実験を実施する。実験は、JT-60と同程度のプラズマを実現するための研究開発を実施する。

主な申請事項	プラズマ発生装置 (JT-60)	運転再開後(プラズマ発生装置(JT-60SA))		
	運転休止中	統合試験運転 (2020年度 (令和2年度))	実験運転-1 (2023年度(令和5年度)~) (中性子発生量はJT-60と同一)	実験運転-2以降 (2026年度(令和8年度)以降予定)
主なガス	重水素、水素	水素	重水素、水素	重水素、水素
週間中性子発生量	3.1×10^{18} 個/週	—	3.1×10^{18} 個/週	2.5×10^{20} 個/週
3月中性子発生量	2.1×10^{19} 個/3月	—	2.1×10^{19} 個/3月	7.0×10^{20} 個/3月
年間中性子発生量	3.2×10^{19} 個/年	—	3.2×10^{19} 個/年	1.0×10^{21} 個/年

- ・統合試験運転は、水素で超伝導コイル等の装置の機能を確認。NBI加熱装置は、設置しない。
- ・実験運転-1は、重水素でプラズマを実現し、中性子発生量はJT-60と同一。NBI加熱装置設置。
※放射性同位元素等規制法における運転再開の変更申請内容は、実験運転-1の内容。
- ・実験運転-2以降は、高性能プラズマの長時間維持を実現のため、最終的に年間の中性子発生量は、JT-60に比べ数十倍程度となる。→変更申請等については、段階的に実施予定。

2-5 放射線発生装置(プラズマ発生装置)の変更箇所-1

プラズマ発生装置の運転再開において申請書本文中の性能の変更箇所は、最大プラズマ電流、NBI加熱装置及び最大中性子発生量である。

放射線発生装置	
種類	プラズマ発生装置 (重水素とトリチウムとの核反応における臨界プラズマ条件を達成する能力をもつ装置であって、専ら重水素と重水素との核反応を行うものに限る)
台数	1台
性能	最大プラズマ電流: 5.5 MA (7.0MA) NBI加熱装置: ①正イオン源 8ユニット (14ユニット) 加速電圧 85 kV (120 kV)、ビーム引出し電流 448 A (1120A)(合計)、 最大トラス入力 13.5 MW (40 MW) ②負イオン源 2ユニット 加速電圧 500 kV、ビーム引出し電流 44 A(合計)、最大トラス入力 10 MW 最大加熱入力 23.5 MW (54 MW) 最大DD核融合熱出力 : 3.6MJ (270 kW) 最大中性子発生量 : 3.1×10^{18} 個/週間 (瞬間最大中性子発生量 2.3×10^{17} 個/s)
使用の目的	核融合炉開発のためのプラズマ制御技術の開発研究
使用の方法	重水素ガスをNBI加熱装置により加熱して高温プラズマを発生させる。 最大DD核融合熱出力 : 週間 3.6 MJ、3月間 24.7 MJ、年間 37.2 MJ 最大中性子発生量 : 週間 3.1×10^{18} 個、3月間 2.1×10^{19} 個、年間 3.2×10^{19} 個

※: 青字が運転休止前の性能

2-5 放射線発生装置(プラズマ発生装置)の変更箇所-2

プラズマ発生装置の運転再開に伴い、管理区域の設定を見直す(運転休止前に戻す、または新設)。貫通口を変更する(遮蔽の新設、または改修)。

・使用施設の変更箇所

1) 管理区域の設定

JT-60実験棟地階のRF増幅室Iの管理区域の設定(運転休止前に戻す)

JT-60実験棟地下1階地下ダクトI、VII及びXIの管理区域の設定

(運転休止前に戻す)


JT-60実験棟能動粒子線電源室の管理区域設定(新設)

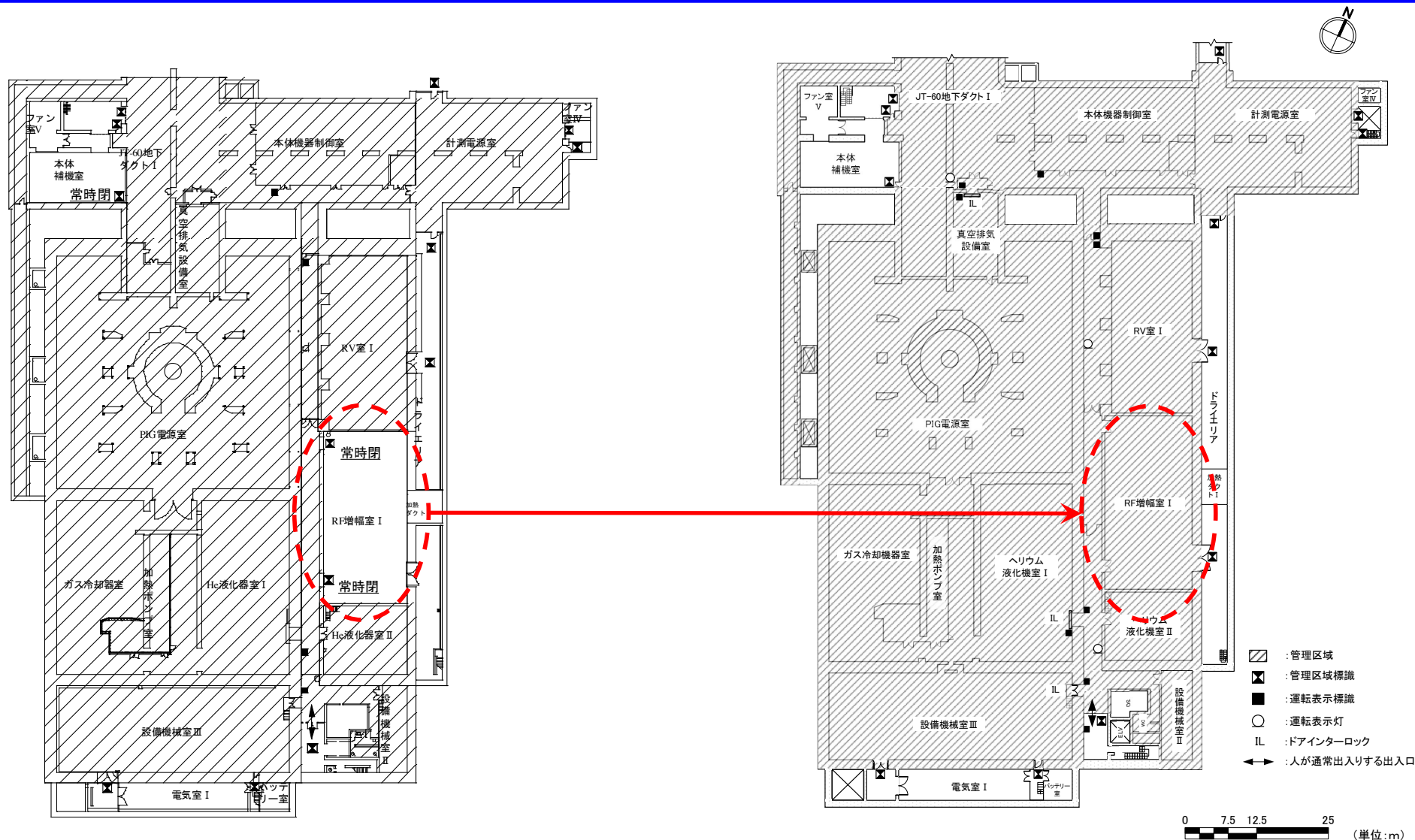
2) 貫通口を変更

本体室1階東側廊下ケーブルダクト(新設)

能動粒子線電源室 ダクト (新設及び改修)

これら変更箇所は、放射性同位元素等規制法に基づくプラズマ発生装置の性能向上を目的とするものではなく、プラズマ発生装置本体の改造の一部である。

2-5 放射線発生装置(プラズマ発生装置)の変更箇所-2-1 

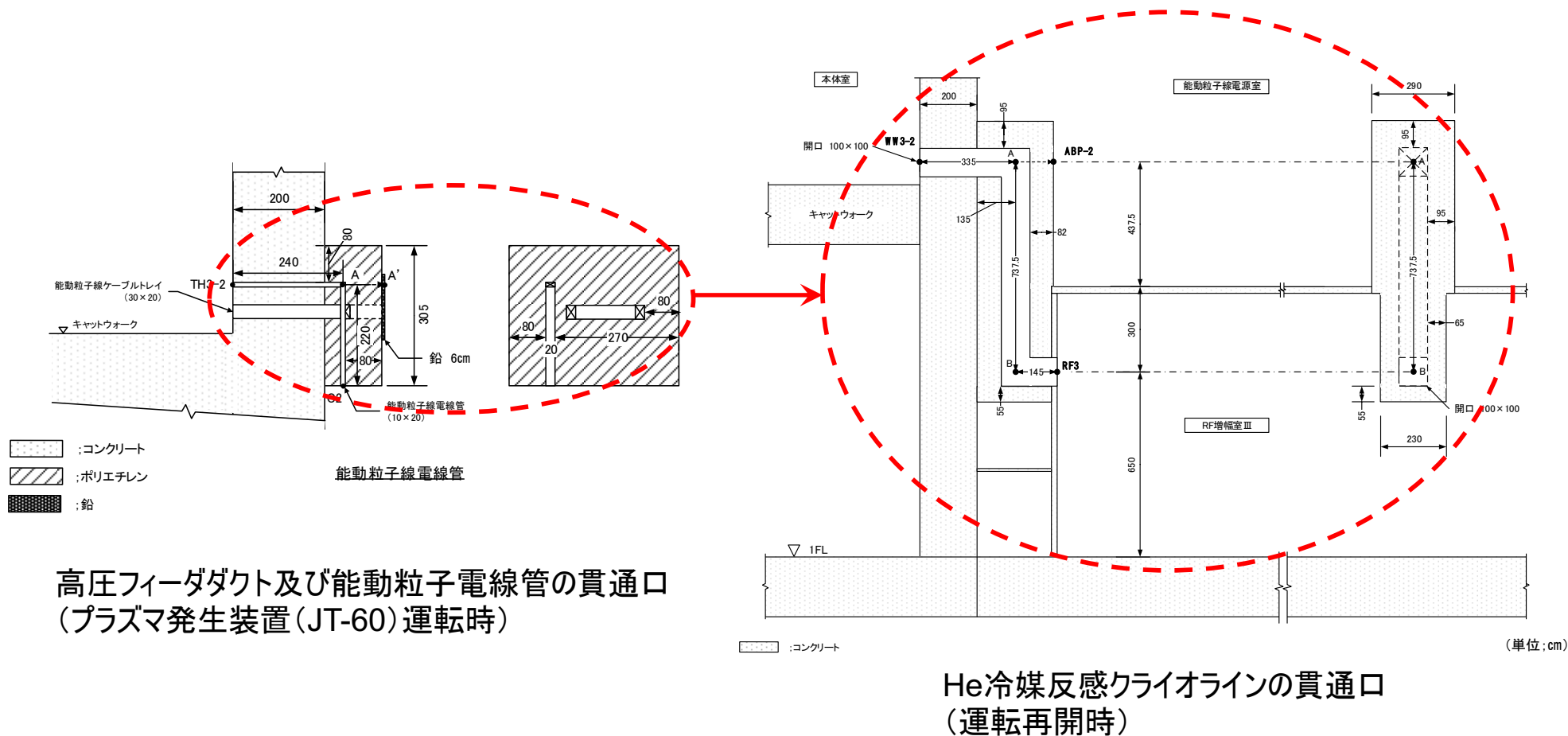


JT-60実験棟地階平面図
(運転休止中)

JT-60実験棟地階平面図
(運転再開)

JT-60実験棟地階にあるRF増幅室Iのように、休止中に管理区域を解除した場所について、運転再開時に管理区域に戻す。

2-5 放射線発生装置(プラズマ発生装置)の変更箇所-2-2 

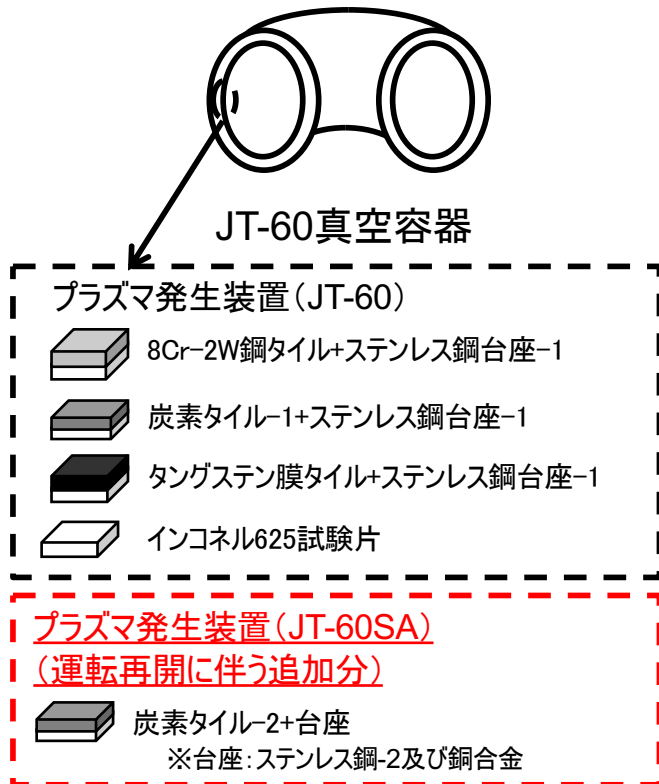


貫通口の大きさ及び遮蔽構造を変更するが、放射性同位元素等規制法に基づくプラズマ発生装置の性能向上を目的とする変更ではなく、プラズマ発生装置本体の改造の一部としての変更である。

非密封RI

プラズマ発生装置において真空容器内の第一壁(真空容器構造材含む)の開発研究のため、トリチウム及び金属核種の分析等を実施してきた。プラズマ発生装置の運転再開に伴い、新たな第一壁の開発研究を予定している。

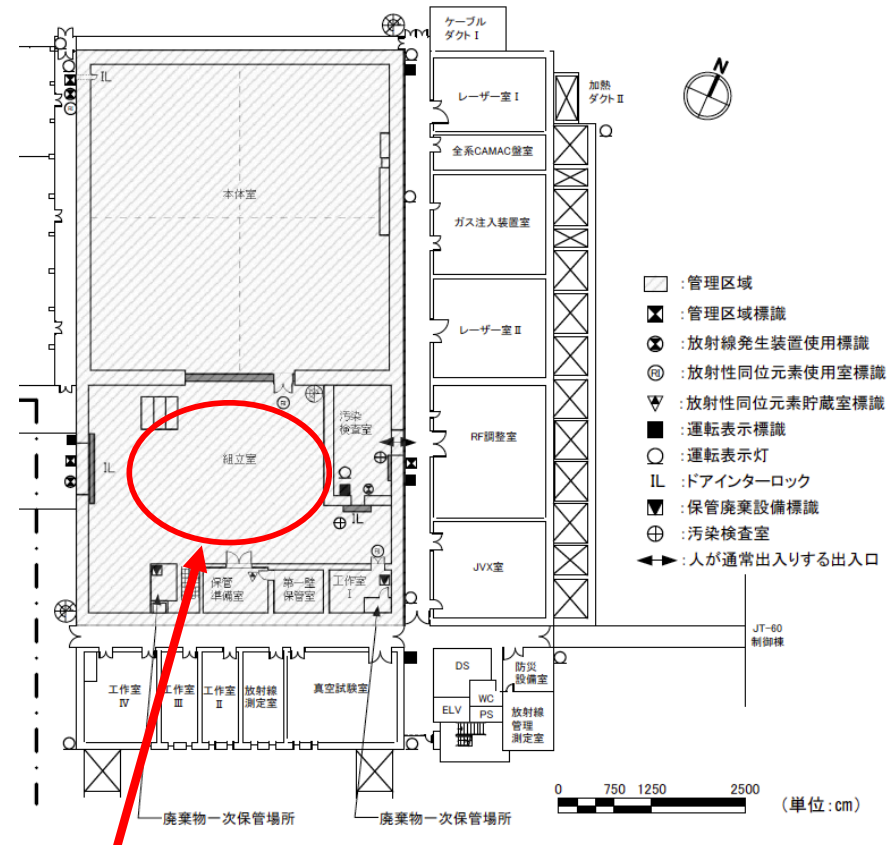
- 1) プラズマ発生装置の既存のタイル等の使用数量の適正化(減少)
- 2) プラズマ発生装置の運転再開に伴うタイル等の使用数量、核種及び貯蔵数量の追加



密封RI

プラズマ発生装置から発生する中性子を測定する中性子検出器の校正を行うため、 ^{252}Cf 240MBq(変更なし)を使用する。

- 1) 検出器の動作確認のため、使用場所として、JT-60実験棟組立室を追加。
- 2) 校正の測定箇所の増加による作業時間の増加。



使用場所に組立室を追加

非密封RIの主な変更箇所

1) JT-60の既存の第一壁の使用数量の適正化

表 1日最大使用数量(例工作室I)

	今回申請	前回申請
8Cr-2W鋼(フェライト鋼)	10	100
W膜	10	100
ステンレス鋼台座-1	10	300

※3月及び年間の使用数量も同様に適正化

2) 運転再開に伴う第一壁の使用数量(追加分)

表 1日最大使用数量(例工作室I)

	今回申請
炭素タイル-2	100
ステンレス鋼台座-2	10
銅合金製台座	10

※3月及び年間の使用数量も追加

3) 貯蔵室(第一壁保管室)の貯蔵能力(³Hを含む16核種から20核種へ変更)

表 貯蔵能力

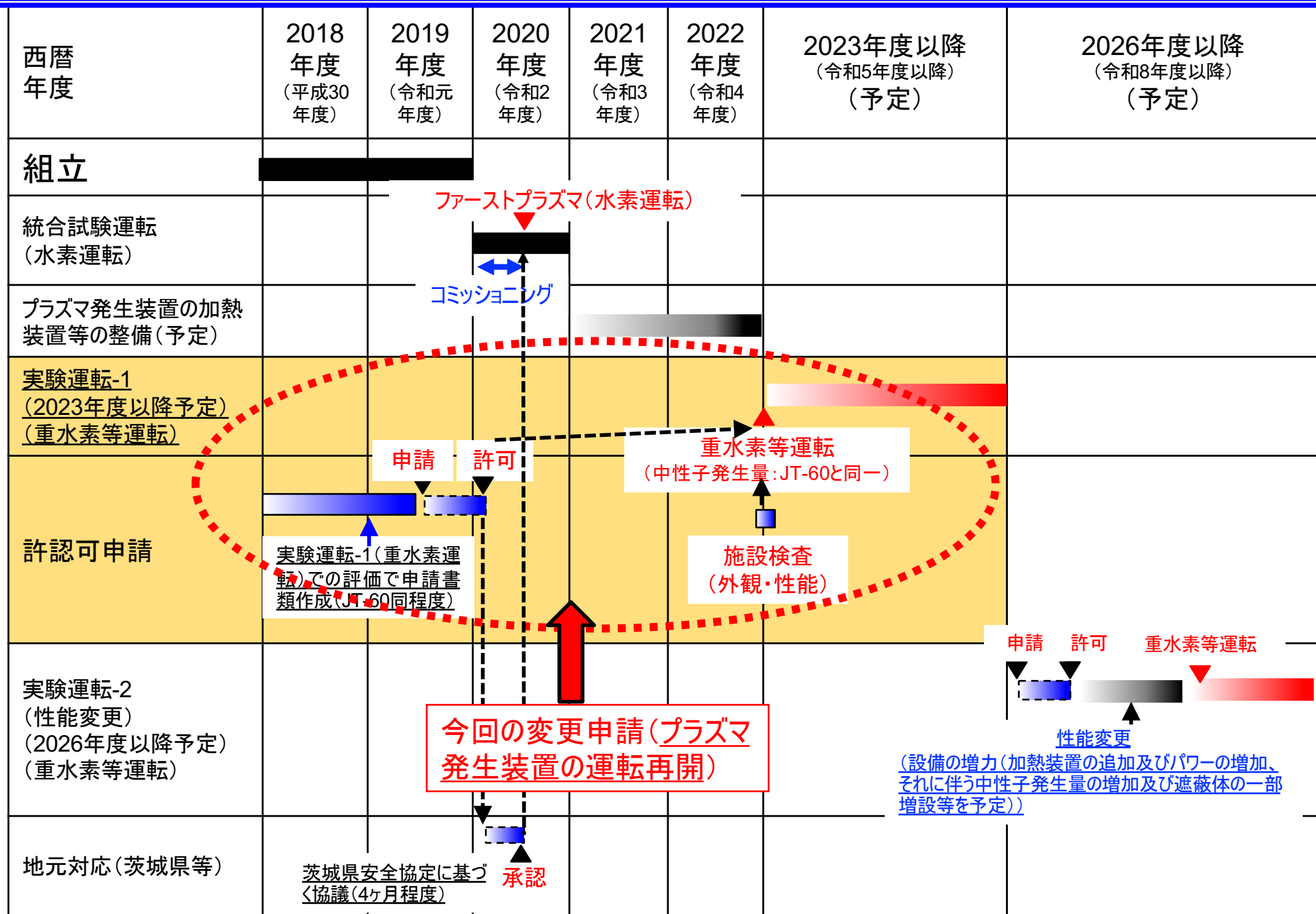
	今回申請	前回申請
下限数量の10万倍との比	1.47×10^{-2}	1.40×10^{-2}

下限数量の10万倍との比は、1以下であり、特定許可使用者に該当せず、
今回の貯蔵量の増加は、施設検査に該当しない。

密封RIの主な変更箇所

核種	使用の方法	使用の場所
²⁵² Cf	週間 61時間、3月間最大 366時間使用する。	JT-60実験棟本体室及び組立室
備考	校正箇所増加により使用時間が増加。	使用の場所を追加。

2-7 プラズマ発生装置の運転及び申請スケジュール



3-1 放射性同位元素等規制法に基づく評価項目

重水素運転で発生する放射線及び放射性同位元素は、重水素核融合反応により、中性子線、2次 γ 線、 ^3H が発生する。また、重水素核融合反応で発生した中性子線より空気が放射化され ^{41}Ar 、 ^{13}N が発生する。これら放射線(中性子線、2次 γ 線)の発生量より管理区域境界や事業所境界における線量を評価し、放射性同位元素(^3H 、 ^{41}Ar 、 ^{13}N)の発生量より、排気・排水濃度を評価する。密封RI(^{252}Cf)や非密封RI(^3H 等)に関しても線量、排気・排水濃度を評価する。

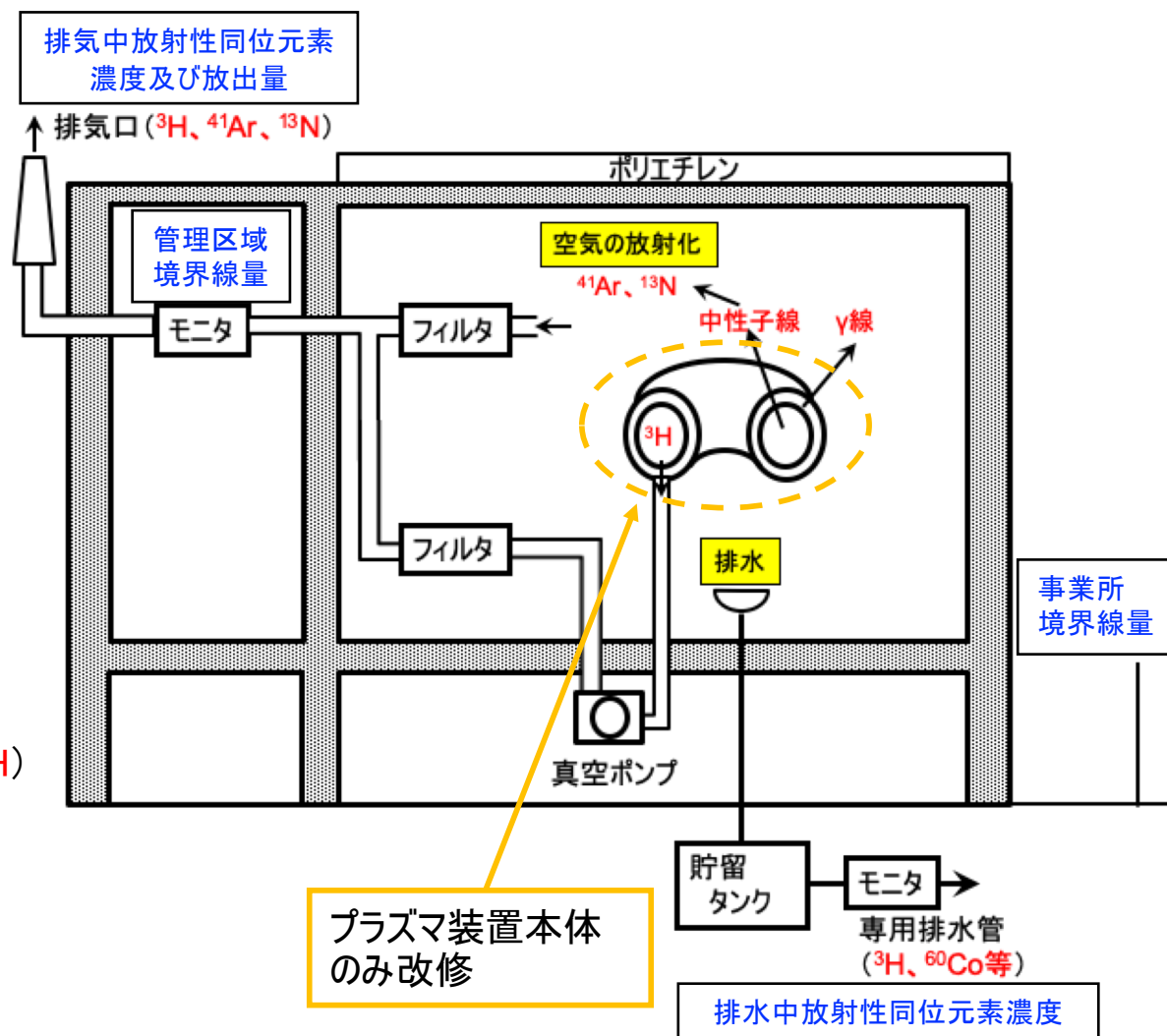
(1)線量

- ・管理区域内の人が常時立入る場所 (1mSv/週)
- ・管理区域境界 (1.3mSv/3月)
- ・事業所境界 (250 μ Sv/3月)

→を満たすため遮蔽等により、放射線による人体の被ばくを防護する。

(2)誘導放射能(排気・排水等)

- ・排気中放射能濃度 (^{41}Ar 、 ^{13}N 、 ^3H)
- ・空气中放射能濃度 (^{41}Ar 、 ^{13}N 、 ^3H)
- ・排水中放射能濃度 (^{60}Co 等の γ 核種、 ^3H)



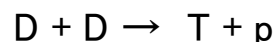
プラズマ装置本体のみ改修

貯留タンク → モニタ → 専用排水管 (^3H 、 ^{60}Co 等)
排水中放射性同位元素濃度

JT-60では、2次元Sn輸送計算コード(DOT3.5)を用いており、JT-60SAでは、信頼性及び精度が高く、複雑な形状のモデル化が可能であり、JT-60SAと同程度の中性子エネルギー(20MeV以下)を取り扱う福井県立病院、放医研、北海道大学及びJ-PARC等の許認可での評価でも実績のある**3次元中性子輸送計算コード(PHITS)**を用い、建家屋内の線量を算出。また、直達線及びスカイシャインの評価を実施し、事業所境界の実効線量を算出。放射化計算により排気中の濃度を算出。

重水素放電で発生する放射線

(1) 重水素核融合反応 (2) 重水素、トリチウム核融合反応



重水素核融合反応では、(1)の2つの反応がほぼ同確率で起こる。
 また、(1)で生成されたトリチウム(T)は、重水素と反応し(2)のような二次反応を起こす。

最大中性子発生条件

一次反応で2.45MeVのDD中性子を97%、二次反応で14MeVのDT中性子を3%として評価した。実効線量評価に与える寄与が大きい14MeVの中性子の割合は、実測値より約3倍程度大きい値(3%)※を採用し、安全側で評価した。
 (※: 世界のトカマク型核融合装置である欧州のJETでは~1.4%¹⁾、米国のTFTRでは~1.0%²⁾、JT-60では~1.0%^{3),4)}である。)

運転条件

最大中性子発生量※ (JT-60と同一)

年間最大中性子発生量: 3.2×10^{19} n/年

3月間最大中性子発生量: 2.1×10^{19} n/3月間

週間最大中性子発生量: 3.1×10^{18} n/週間

(※: 計算で算出したJT-60SAでの中性子発生率の最大値が 1.5×10^{17} 個/s⁵⁾(JT-60許可値は、 2.3×10^{17} 個/s)となり、これは、JT-60での運転実績(5.0×10^{16} 個/s)での最大中性子発生率の3倍程度高い値であり、安全側で評価している。この中性子発生率に基づき、週間、3月間、年間の中性子発生量は、JT-60と同一とした。)

参考文献

- 1) P. Batistoni, et al., 1988 EPS P7 A1 07(1988).
- 2) J. D. Strachan, et al., 12th IAEA Conf. CN-50/A-IV-5 (1988).
- 3) M. Hoek, T. Nishitani et al., JAERI-M 94-002 (1994).
- 4) M. Hoek, T. Nishitani et al., Nucl. Instr. Methods A 368, 804-814 (1996).
- 5) J. Garcia et al., Nucl. Fusion 54, 093010(2014).

3-3 プラズマ発生装置 (JT-60及びJT-60SA) の中性子輸送計算モデル及び線源条件

JT-60の中性子輸送計算

- ・計算コード: DOT 3.5
- ・群定数: GICX40(n 42, γ 21)

JT-60の中性子輸送計算で用いたモデルには、2次元であり、JT-60SAのモデルに比べ真空容器のみを考慮しており、外側にはほとんど遮蔽物のない安全側で評価している。

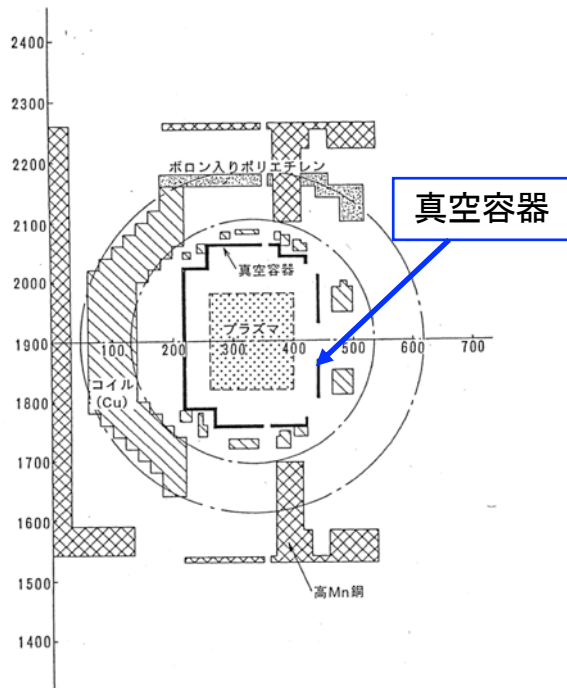
線源は、プラズマ領域から均一に発生させ、中性子は等方に散乱させた。

JT-60SA中性子・ガンマ線輸送計算

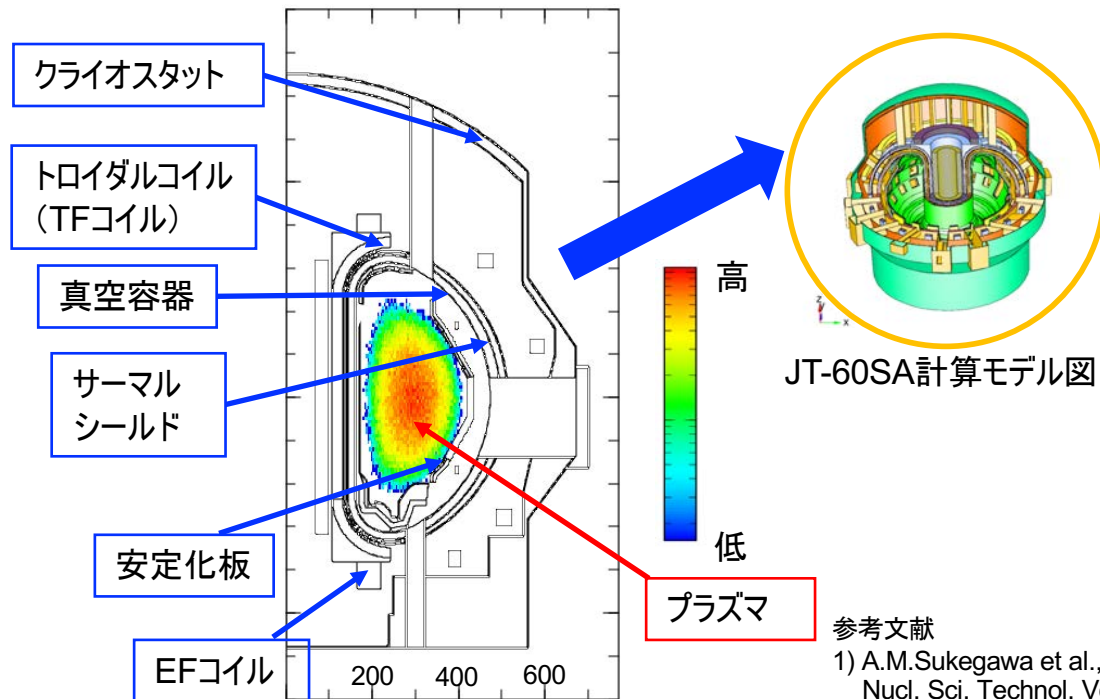
- ・計算コード: PHITS
- ・輸送計算断面積ライブラリー: JENDL-4

JT-60SAの中性子・ガンマ線輸送計算で用いたモデルは3次元であり、正確に機器の形状を入力することが可能なために、JT-60に比べ真空容器だけでなく、クライオスタット、TFコイル等を遮蔽物として考慮した。

線源は、JT-60の実績に基づき最も高い中性子発生率(瞬間)を真空容器内部から等方的に発生させた。その際、中性子発生源であるプラズマの大きさは、線量評価及び遮蔽計算上最も厳しい条件とするため、真空容器内で生成できる最大の大きさとし、2次元軸対称の中性子体積線源を使用した^{1),2)}。



JT-60本体計算モデルと中性子線源



JT-60SA本体計算モデルの断面図と中性子体積線源

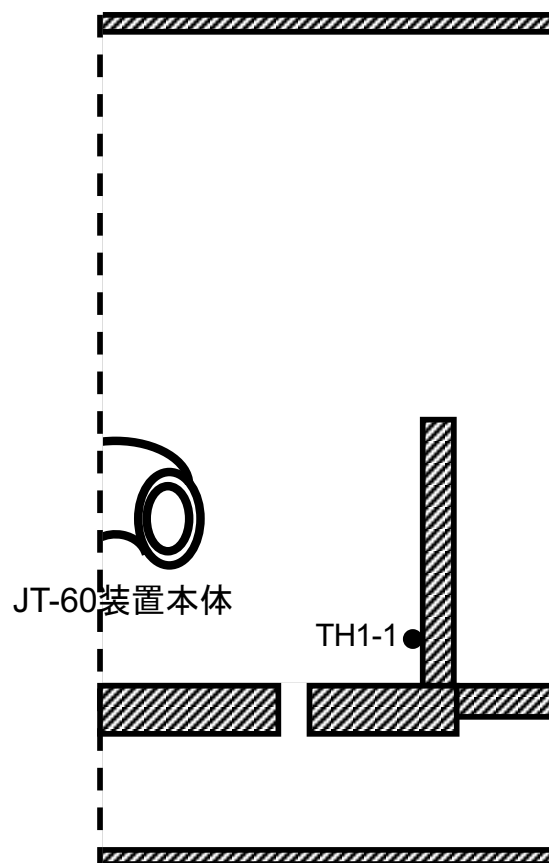
参考文献

- 1) A.M.Sukegawa et al., Progress in Nucl. Sci. Technol, Vol.1, 36-39 (2011).
- 2) T.Nishitani et al., Rev. Sci. Instrum. 63[11],5270(1992).

3-4 プラズマ発生装置のJT-60実験棟本体室・組立室の実効線量

建屋内の評価点 (TH1-1) での実効線量

	実効線量 (mSv/週)	
	認可されているJT-60の許可値 (DOT3.5) (一部構造体考慮)	JT-60SA (PHITS) (18の構造体考慮)
TH1-1	1.80×10^4	1.21×10^4



JT-60SAが設置されているJT-60実験棟建屋断面図及び評価点

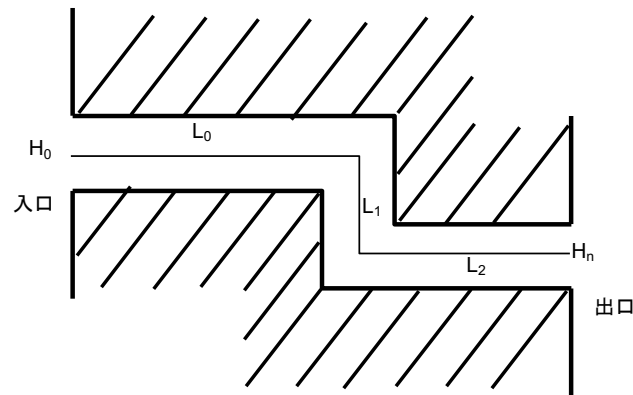
JT-60実験棟本体室及び組立室内における実効線量を、既に認可されているJT-60の許可値と比較した。

その結果、JT-60SAでの実験棟本体室及び組立室内における実効線量は、JT-60の6割程度であった。このJT-60に比べJT-60SAの実効線量が低くなったのは、今回JT-60SAのモデルに取り入れた構造物(遮蔽体)による中性子の減衰に起因する。遮蔽の効果を検討すると以前に認可を受けたJT-60の計算モデルと同様の結果が、今回使用したJT-60SA用の計算モデルからも得られている。

3-5 プラズマ発生装置貫通口からの中性子漏洩計算

JT-60実験棟本体室・組立室内において貫通口は約40箇所。それら貫通口出口の実効線量評価については、PHITSにより算出された貫通口入口部（壁近傍）の実効線量を入力し、サイモン・クリフォードの円筒屈曲ダクトの式¹⁾により評価する。この中性子漏洩量と遮蔽壁（コンクリート）からの透過量により管理区域境界の実効線量を評価する。

本評価式の推奨適用範囲は、ダクト直径に対し、ダクトの脚長が2倍以上となっており、JT-60実験棟内のダクトにおいては、適用範囲内である。また、本評価においては、安全係数を4としており安全側評価としている。（JT-60と同じ評価方法）



$$\frac{H_n}{H_0} = C \left[\frac{d_0^2}{8L_0^2} \right] \left[\frac{\alpha d_1^2}{8L_1^2 \sin \theta_1} \right] \dots \left[\frac{\alpha d_n^2}{8L_n^2 \sin \theta_n} \right]$$

H_n : ダクト出口の漏洩実効線量（中性子）(mSv)

H_0 : ダクト入口の実効線量（中性子）(mSv)

d_j : ダクト入口の等価直径 $= (4a_j b_j / \pi)^{0.5}$ (cm)

L_j : ダクトの長さ (cm)

θ_j : 屈曲の角度

α : アルベド
コンクリートの場合 0.7
ポリエチレンの場合 0.3

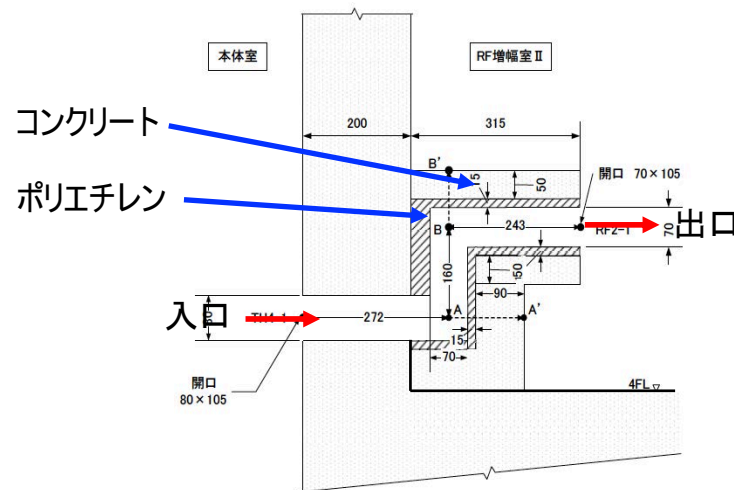
C: 安全係数 = 4

a_j, b_j : ダクト断面の寸法 (cm)

ガンマ線の場合、同じ式を用いて $C=1$ 、及び $\alpha=0.1$ とする。

参考文献

1) 「遮蔽計算の応用技術」研究専門委員会、放射線遮蔽ハンドブック-応用編-



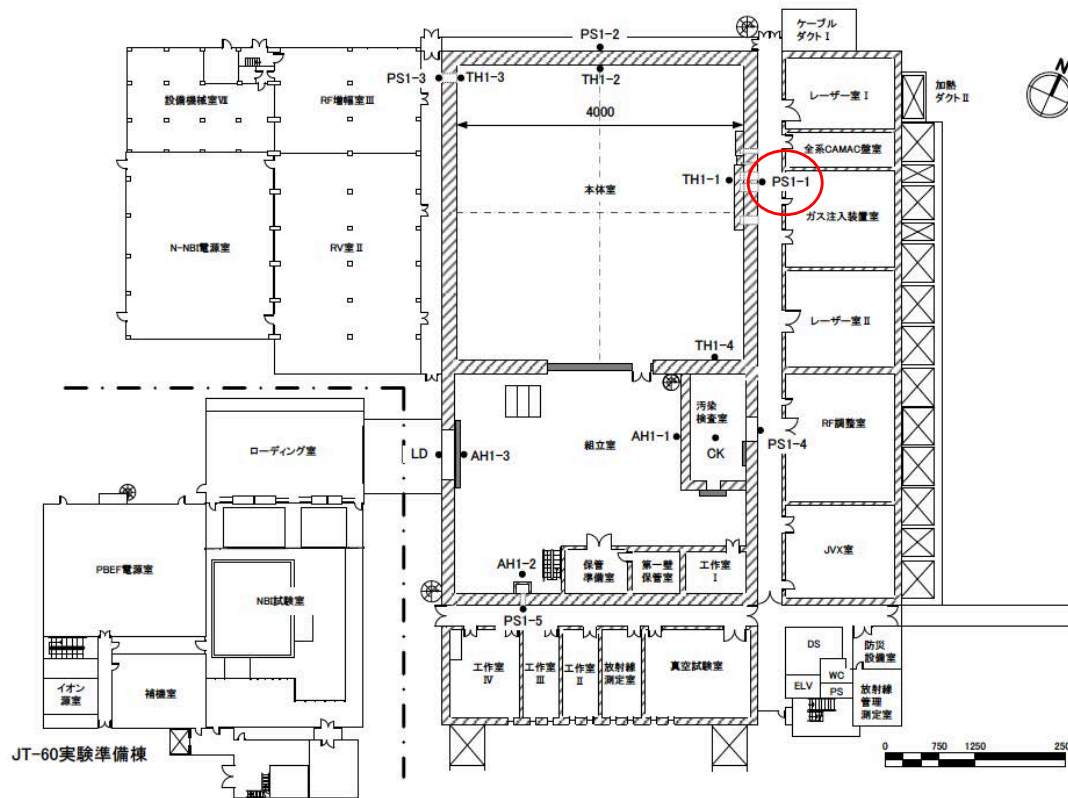
プラズマ発生装置の運転再開時の貫通口の遮蔽構造図(例)

プラズマ発生装置の運転再開時の貫通口での計算結果の例

評価点	実効線量 (mSv/週)
入口 (本体室内側壁) TH4-1	6.10×10^3
貫通口出口 RF2-1	1.06×10^{-3} (7.18×10^{-3} (mSv/3月))

貫通口出口での実効線量は、法令で定められた人が常時立ち入る場所 (1mSv/週) 及び管理区域境界の実効線量限度 (1.3mSv/3月) を超えることはない。

3-6 プラズマ発生装置運転時の管理区域境界の実効線量 



JT-60実験棟1階平面図及び管理区域境界評価点

1) 管理区域の評価点の設定

JT-60実験棟の管理区域境界の評価点は、1～4階の東西南北について、貫通部含め最大となる地点とした。

2) 遮蔽体中の中性子の減衰

JT-60の許認可でも使用されており、他の施設でも広く用いられている1次元ANISN¹⁾(無限平板モデル)により計算。コンクリートの密度は、当初2.3g/cm³を用いたが、2.1g/cm³を用いることで安全側の評価とする。JT-60実験棟のコンクリートは、1.7～2.0mの厚さであり、それを用いる。

参考文献

1) W.W.Engle, Jr., K-1693, Union Carbide Corp.(1967).

JT-60実験棟管理区域境界における実効線量

場所	地点	管理区域境界の実効線量 (mSv/3月)		法令値 (mSv/3月)
		JT-60	JT-60SA	
JT-60実験棟 東側廊下	PS1-1	1.7 × 10 ⁻¹	1.2 × 10 ⁻¹	1.3

管理区域境界における実効線量は、中性子輸送計算で算出したJT-60実験棟本体室・組立室壁近傍の実効線量を用い、コンクリート壁からの透過量やダクトの中性子漏洩量により評価する。

JT-60に比べJT-60SAでは、モデルに取り入れた構造体(遮蔽体)を考慮した結果、JT-60実験棟内側壁の実効線量が低くなるため、管理区域境界における実効線量も低く、この評価結果は妥当と考える。

また、JT-60実験棟管理区域境界の各評価点における実効線量は、最大で1.16mSv/3月であり、全ての評価点において法令で定められた管理区域境界の実効線量限度(1.3mSv/3月)を超えることはなく、法令に適合している。

3-7 プラズマ発生装置運転時の事業所境界の実効線量



事業所境界での実効線量評価では、直達線及びスカイシャインについて評価する。

また、プラズマ及びNBI加熱装置からの実効線量については、別々に計算する。

事業所境界の評価点は、JT-60実験棟から見て、東西南北4カ所について、最大となる地点とした。



プラズマ発生装置の運転再開時の事業所境界の実効線量

	JT-60	JT-60SA	法令値 ($\mu\text{Sv}/3\text{月}$)
南側	3.5	2.5	250
東側	0.57	0.34	
北側	0.89	0.53	
西側	1.7	1.10	

プラズマ発生装置運転再開時の事業所境界における実効線量は、PHITSで評価したJT-60SAの実効線量が低く、この結果は、妥当であると考えます。

また、最大となる評価点は、南側の $2.5\mu\text{Sv}/3\text{月}$ であり、法令で定められた事業所境界における実効線量限度($250\mu\text{Sv}/3\text{月}$)を超えることはなく、法令に適合している。

3-8 プラズマ発生装置運転時の 排気中放射性同位元素濃度



重水素核融合反応により生成した ^3H と空気の放射化により生成した ^{13}N 及び ^{41}Ar の3月間の放出量と3月間の排気量により、それぞれの3月間平均排気中濃度を評価する。

1) 核融合反応におけるトリチウムの発生量

$$Q_T = Q_n \times 0.693/T_h$$

Q_T : トリチウム発生量 (Bq)

Q_n : 中性子発生量 (n)

T_h : トリチウムの半減期 = 3.89×10^8 (秒)

2) 空気の放射化

熱中性子及び高速中性子 (2.5MeV及び14MeV) と空気の核反応により生成される核種のうち、核反応しきエネルギーが14MeV以下であり、空気中の存在比及び反応断面積が大きく、かつ半減期が1分以上の核種は、 ^{41}Ar 及び ^{13}N である。

熱中性子による放射化

$$\bar{C}_\tau = \lambda \bar{N}_\tau = \frac{\lambda}{\lambda + m} \cdot N_0 \cdot \sigma \cdot \frac{1}{\tau} \int_0^\tau \phi_{th}(t') dt'$$

高速中性子による放射化

$$\bar{C}_\tau = \frac{\lambda}{\lambda + m} \cdot N_0 \cdot \sigma \cdot \frac{1}{\tau} \int_0^\tau \langle \phi_f(t') \rangle dt'$$

C_τ : 放射能濃度 (Bq/cm³)

N_τ : 放射性核種の原子個数密度 (atom/cm²)

N_0 : 標的核種の原子個数密度 (atom/cm²)

Φ_{th} : 熱中性子線密度 (n/(cm²·s))

Φ_f : 高速中性子線密度 (n/(cm²·s))

σ : 反応断面積

λ : 崩壊定数 (s⁻¹)

m : 換気回数 (s⁻¹)

排気口における3月間平均の放射性同位元素濃度

核種	3月間放出量 (GBq)	排気口濃度 (Bq/cm ³)	濃度限度 (Bq/cm ³) (法令値)	濃度限度との比
^3H	37.4	1.56×10^{-4}	5.00×10^{-3}	3.11×10^{-2}
^{13}N	7.20	3.00×10^{-5}	7.00×10^{-4}	4.28×10^{-2}
^{41}Ar	46.7	1.94×10^{-4}	5.00×10^{-4}	3.89×10^{-1}
合計				4.63×10^{-1}

^3H 、 ^{13}N 及び ^{41}Ar の排気口における濃度を評価した結果、それらの濃度限度との比の和は、1以下であり、法令に適合している。

核種及び数量について

- ・第一壁の放射エネルギーは、P20に示すように、これまでのJT-60の実績から最も中性子束が高くなる線源条件を用い、その中性子による核反応を評価する。その放射エネルギーは、放射エネルギーを評価するために広く用いられている放射化計算コードDCHAIN-SP^{1)~4)}を用いて評価した。
- ・第一壁の³H滞留量は、欧州JET⁵⁾や米国TFTR⁶⁾等の実績から、JT-60で認可された許可値と同様、年間³H発生量の1/100となる³Hが真空容器内に滞留するとし、42kBq~55kBq/枚とする。

評価点について

- ・管理区域境界は、JT-60実験棟の最大となる地点とし、事業所境界の評価点は、JT-60実験棟から見て、東西南北4カ所について、最大となる地点とした。

実効線量の評価について

- ・1日の最大使用数量を用い、放射線施設のしゃへい計算実務マニュアルに基づき評価する。

$$D = \sum (S_i \cdot f_i \cdot f_a) / x^2$$

D: 評価点での実効線量

S_i: 核種の線源強度(1日最大使用数量)

f_i: 実効線量率定数

f_a: 実効線量透過率

核種の線源強度は、1日の最大使用数量を使用したとする。実効線量は、1週間の人が常時立ち入る場所については、作業時間を40時間/週とし、管理区域境界及び事業所境界については、作業時間を500時間/3月として安全側に評価する。JT-60実験棟のコンクリート厚さは1.7~2.0mであり、密度は安全側として、2.1g/cm³での透過率を用いる。

非密封RIの変更による実効線量

	評価項目	場所	人が常時立ち入る場所 [mSv/週]	管理区域境界 [mSv/3月]	事業所境界 [μSv/3月] (南側S点)
非密封RI	使用施設	工作室I	8.90 × 10 ⁻²	2.71 × 10 ⁻⁷	1.00 × 10 ⁻²
	貯蔵施設	第一壁保管室	9.24 × 10 ⁻²	2.82 × 10 ⁻⁷	2.36 × 10 ⁻³
	廃棄施設 ^{※1}	廃棄物保管室	4.70 × 10 ⁻²	5.70 × 10 ⁻¹	9.18 × 10 ⁻¹

※1: 廃棄施設は、今回変更なし。

・法令で定められている人が常時立ち入る場所(1mSv/週)、管理区域境界(1.3mSv/3月)、事業所境界(250μSv/3月)の実効線量限度を超えることはなく、法令に適合している。

参考文献

- 1) T. Sato et al., J. Nucl. Sci. Technol. 55, 684-690 (2018)
- 2) H. Takada et al., JAERI-Data/Code 99-008 (1999)
- 3) 甲斐哲也, 他5名, JAERI-Data/Code 2001-016 (2001)
- 4) DCHAIN-SP2014マニュアル (2015)
- 5) D.H. J. Doodall et al. : J. Nucl. Materials, 162-164(1989)1059
- 6) H. F. Dylla et al. : Princeton Plasma Phys. Laboratory and Sandia Report PPPL-2523/SAND 88-8212(1988)

3-9 非密封RIに係る実効線量及び濃度-2

空气中、排気中及び排水中の放射性同位元素濃度は、1日及び3月間の最大使用数量を用い、科学技術庁原子力安全局放射線安全課長通知(平成12年10月)に基づき評価する。

・空气中における1週間平均濃度

(1日の最大使用数量) × (1週間当たりの使用日数(5日)) × (飛散率) / (1週間の総排気量)
飛散率 ^3H : 1、その他金属核種: 0.01 (フード以外のときの飛散率を用いる。)

・排気口における3月間平均濃度

(3月間の使用数量) × (飛散率) × (透過率) / (3月間の総排気量)
飛散率 ^3H : 1、その他金属核種: 0.01
透過率 ^3H : 1、その他金属核種: 0.01

総排気量は、最大128,000m³/hであるが、換気率1回/hとなる110,000m³/hを安全側評価として用いる。

・排水中における濃度

(1日最大使用数量) × (混入率) × (1-除去率) × (当該貯留槽1基の貯水量) / (1日当りの貯留量)
(当該貯留槽1基の貯水量)

混入率 全ての核種: 0.01

イオン交換樹脂の除去率 ^3H : 0、その他金属核種: 0.9

非密封RIの使用時における濃度限度比

評価項目	評価の場所	濃度限度との比
空气中濃度	工作室I	3.80×10^{-4}
排気中濃度	実験棟排気口	4.63×10^{-1} (JT-60SA運転含む)
排水中濃度	排水施設	3.91×10^{-3}

・空气中、排気中及び排水中の放射性同位元素濃度は、法令で定められている濃度限度との比が1以下であり、法令に適合している。

・非密封RIの総合評価をするに当たり、使用施設での作業時間を40h-1h-1h = 38h(貯蔵作業1h、廃棄作業1h)とした場合、実効線量限度との比と空气中濃度限度との比の和は、 2.24×10^{-1} となり、1を超えることはなく、法令に適合している。

3-10 密封RIに係る実効線量

密封RIの変更による実効線量

核種: ^{252}Cf

数量: 240MBq

目的: 中性子検出器の校正に使用する。

使用時間: 61時間/週、366時間/3月間

評価点: 管理区域境界の評価点は、JT-60実験棟で最大となる地点、事業所境界の評価点は、JT-60実験棟から見て、東西南北4カ所について、最大となる地点とした。

実効線量評価: 使用施設及び貯蔵施設における人が常時立ち入る場所、管理区域境界及び事業所境界における実効線量は、 ^{252}Cf の数量及び使用時間を用い、放射線施設のしゃへい計算実務マニュアルに基づき評価する。

$D = \text{中性子実効線量率} + 1\text{次}\gamma\text{線実効線量率} + (\text{遮蔽体2次}\gamma\text{線実効線量率})$

・中性子実効線量率 = $(\Gamma_E \cdot F_n(t) \cdot S_0) \cdot T / r^2$

・1次 γ 線実効線量率 = $(\Gamma_g \cdot F_E(t) \cdot A / 37) \cdot T / r^2$

・2次 γ 線実効線量率 = $(\Gamma_E \cdot F_g(t) \cdot S_0) \cdot R \cdot T / r^2$

Γ_E : 中性子源実効線量率定数

Γ_g : 1次 γ 線実効線量率定数

$F_n(t)$: 遮蔽材による中性子線透過率

$F_E(t)$: 遮蔽材による1次 γ 線透過率

$F_g(t)$: 遮蔽材による2次 γ 線透過率

S_0 : 中性子発生数

A: 線源の放射能

R: 2次 γ 線の2次遮蔽体以降の透過率

r: 線源から評価点までの距離

T: 作業時間

	評価項目	場所	人が常時立ち入る場所 [mSv/週]	管理区域境界 [mSv/3月]	事業所境界 [$\mu\text{Sv}/3\text{月}$] (南側S点)
密封RI	使用施設	本体室	6.95×10^{-1}	2.71×10^{-1}	8.60×10^{-5}
	貯蔵施設	第一壁保管室	9.24×10^{-2}	2.21×10^{-7}	2.31×10^{-6}

法令で定められている人が常時立ち入る場所(1mSv/週)、管理区域境界(1.3mSv/3月)、事業所境界(250 $\mu\text{Sv}/3\text{月}$)の実効線量限度を超えることはなく、法令に適合している。

那珂核融合研究所における総合評価として、プラズマ発生装置(JT-60SA)の運転時に加え、他施設(JT-60廃棄物保管棟等)からの寄与分を合算した場合の事業所境界における実効線量を評価する。

評価点: 各建屋で実効線量が最大となる地点を算出し、これらすべてを合算し評価する。

	プラズマ発生装置 運転 ($\mu\text{Sv}/3\text{月}$)	他施設 ($\mu\text{Sv}/3\text{月}$)	合計 ($\mu\text{Sv}/3\text{月}$)	法令値 ($\mu\text{Sv}/3\text{月}$)
南側	2.48	4.28	6.76	250
東側	3.36×10^{-1}	4.21	4.55	
北側	5.34×10^{-1}	9.77	10.3	
西側	1.10	3.68	4.78	

1) プラズマ発生装置(JT-60SA)運転による事業所境界実効線量が最大となる地点

南側評価点: 2.48 $\mu\text{Sv}/3\text{月}$

2) 他施設(JT-60廃棄物保管棟等)を加えた場合の事業所境界実効線量が最大となる地点

北側評価点: 10.3 $\mu\text{Sv}/3\text{月}$

※JT-60廃棄物保管棟は、JT-60SAを20年間運転した場合に発生する廃棄物を保管したとして評価しているため、他施設を加えた場合は、北側評価点への影響が大きくなる。

いずれの評価点においても法令で定められた実効線量限度(250 $\mu\text{Sv}/3\text{月}$)を超えることはなく、法令に適合している。



核融合エネルギーの研究開発の一環として実施している、幅広いアプローチ活動の下、日欧で協力し、JT-60装置の改修をおこなってきた。令和2年3月に装置を完成し、装置全体の試運転を行い、水素プラズマを用いた統合試験運転(令和2年9月ファーストプラズマ)を実施した後、放射性同位元素等規制法の対象となる重水素プラズマの運転を令和5年から開始する予定である。

- ・ プラズマ発生装置については、適切な線源設定、計算方法及び評価点の設定により、管理区域境界、事業所境界における実効線量及び排気中の濃度を評価したところ、法令値を下回ることを確認した。
- ・ 非密封RIについては、適切な線源設定、計算方法及び評価点の設定により、実効線量及び空気中、排気中及び排水中の濃度を評価したところ、法令値を下回ることを確認した。
- ・ 密封RIについては、適切な線源設定、計算方法及び評価点の設定により、実効線量を評価したところ、法令値を下回ることを確認した。
- ・ 那珂核融合研究所における事業所境界等の実効線量合算値についても、適切な評価点の設定により、法令値を下回ることを確認した。