



JAEA-Technology

2023-025

DOI:10.11484/jaea-technology-2023-025

J-PARC照射後試験施設概念検討

Conceptual Study of Post Irradiation Examination (PIE) Facility at J-PARC

斎藤 滋 明午 伸一郎 牧村 俊助 平野 幸則
堤 和昌 前川 藤夫

Shigeru SAITO, Shinichiro MEIGO, Shunsuke MAKIMURA, Yukinori HIRANO
Kazuyoshi TSUTSUMI and Fujio MAEKAWA

原子力科学研究部門
J-PARCセンター
核変換ディビジョン

Nuclear Transmutation Division
J-PARC Center
Sector of Nuclear Science Research

March 2024

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

JAEA-Technology

本レポートは国立研究開発法人日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。本レポートはクリエイティブ・コモンズ 表示 4.0 国際 ライセンスの下に提供されています。本レポートの成果（データを含む）に著作権が発生しない場合でも、同ライセンスと同様の条件で利用してください。（<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ja>）
なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ウェブサイト（<https://www.jaea.go.jp>）より発信されています。本レポートに関しては下記までお問合せください。

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 JAEA イノベーションハブ 研究成果利活用課
〒319-1112 茨城県那珂郡東海村大字村松4番地49
E-mail: ird-support@jaea.go.jp

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency.

This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.en>).

Even if the results of this report (including data) are not copyrighted, they must be used under the same terms and conditions as CC-BY.

For inquiries regarding this report, please contact Institutional Repository and Utilization Section, JAEA Innovation Hub, Japan Atomic Energy Agency.

4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1112, Japan

E-mail: ird-support@jaea.go.jp

J-PARC 照射後試験施設概念検討

日本原子力研究開発機構 原子力科学研究部門 J-PARC センター
核変換ディビジョン

齋藤 滋、明午 伸一郎、牧村 俊助*1、平野 幸則*2、堤 和昌*3、前川 藤夫

(2023年12月1日受理)

日本原子力研究開発機構（JAEA）は、原子力発電に伴い発生する高レベル放射性廃棄物の減容化・有害度低減のため、加速器を使った核変換の研究開発として加速器駆動システム（ADS; Accelerator-Driven Systems）の開発を進めている。ADSの設計に必要な材料照射データベースを作成し、鉛ビスマス共晶合金（LBE; Lead-Bismuth Eutectic）中での照射効果について研究するため、J-PARCに陽子照射施設の検討を進めている。この陽子照射施設では、LBEの核破砕ターゲットに250 kWの陽子ビームを入射し、ADSの構造材候補材についてLBE流動下での照射試験を実施する他、半導体ソフトエラー試験、医療用RI製造、陽子ビーム利用などを行う計画である。これらのうち照射済み試料の照射後試験（PIE; Post Irradiation Examination）とRIの分離精製は、陽子照射施設に付属して建設されるPIE施設において実施される。本PIE施設では、J-PARCの他の施設において照射された機器や試料のPIEも実施される予定である。本報告書は、この照射後試験施設の概念構築に必要な照射後試験項目、試験フロー、設備、試験装置等の検討を行い、施設内の配置案をまとめたものである。

原子力科学研究所：〒319-1195 茨城県那珂郡東海村大字白方 2-4

*1 高エネルギー加速器研究機構

*2 株式会社日本アクシス

*3 株式会社 NAT

Conceptual Study of Post Irradiation Examination (PIE) Facility at J-PARC

Shigeru SAITO, Shinichiro MEIGO, Shunsuke MAKIMURA*¹, Yukinori HIRANO*²,
Kazuyoshi TSUTSUMI*³ and Fujio MAEKAWA

Nuclear Transmutation Division, J-PARC Center
Sector of Nuclear Science Research
Japan Atomic Energy Agency
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received December 1, 2023)

JAEA has been developing Accelerator-Driven Systems (ADS) for research and development of nuclear transmutation using accelerators in order to reduce the volume and hazardousness of high-level radioactive waste generated by nuclear power plants. In order to prepare the material irradiation database necessary for the design of ADS and to study the irradiation effects in Lead-Bismuth Eutectic (LBE) alloys, a proton irradiation facility is under consideration at J-PARC. In this proton irradiation facility, 250 kW proton beams will be injected into the LBE spallation target, and irradiation tests under LBE flow will be performed for candidate structural materials for ADS. Furthermore, semiconductor soft-error tests, medical RI production, and proton beam applications will be performed. Among these, Post Irradiation Examination (PIE) of irradiated samples and RI separation and purification will be carried out in the PIE facility to be constructed near the proton irradiation facility. In this PIE facility, PIE of the equipment and samples irradiated in other facilities in J-PARC will also be performed. This report describes the conceptual study of the PIE facility, including the items to be tested, the test flow, the facilities, the test equipment, etc., and the proposed layout of the facility.

Keywords: ADS, J-PARC, Proton Irradiation Facility, PIE, PIE Facility

* 1 High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

* 2 Nihon Axis Co., Ltd.

* 3 NAT Corporation

目次

1. 施設の目的、機能及び基本構成	1
1.1 施設の目的	1
1.2 施設へのニーズ	1
1.3 施設の機能	2
1.4 施設の基本構成	3
2. 施設の設計条件	5
3. 施設設計	6
3.1 取扱い対象となる試料	6
3.1.1 陽子照射施設からの試料	6
3.1.2 その他の J-PARC 施設からの照射試料	11
3.1.3 試験フロー及び各工程の詳細	13
3.1.4 RI の分離精製	16
3.2 遮蔽厚さの検討	16
3.2.1 コンクリートセルの遮蔽厚さ	17
3.2.2 鉄セルの遮蔽厚さ	17
3.2.3 グローブボックス内機器の追加遮蔽	17
3.3 設備設計の概要	18
3.3.1 コンクリートセル	18
3.3.2 鉄セル	19
3.3.3 ラボ	19
3.3.4 設備リスト	20
3.3.5 廃棄物処理設備	21
3.3.6 ユーティリティ	25
3.3.7 放射線安全管理設備	27
3.4 建家配置案	28
3.5 機器設計の概要	36
3.5.1 試験片製作機器	36
3.5.2 機械強度試験機	38
3.5.3 表面観察機器	41
3.5.4 微細組織観察機器	42
3.5.5 黒鉛材料試験機器	43
3.5.6 LBE 分析機器	44

3.5.7 その他の試験機器	45
3.5.8 RI の分離、精製	46
4. 建設計画	47
5. まとめ	47
謝辞	48
参考文献	48

Contents

1. Facility functions and basic configuration	1
1.1 Scope	1
1.2 Facility main assumptions	1
1.3 Functions	2
1.4 System basic configuration	3
2. System design requirements	5
3. System design description	6
3.1 Samples to be tested	6
3.1.1 Samples from the proton irradiation facility	6
3.1.2 Samples from other J-PARC facilities	11
3.1.3 PIE flow and details	13
3.1.4 RI separation and purification	16
3.2 Consideration of shielding thickness	17
3.2.1 Shielding thickness of concrete cells	17
3.2.2 Shielding thickness of iron cells	17
3.2.3 Additional shielding for equipment in glove box	17
3.3 Equipment design description	18
3.3.1 Concrete cells	18
3.3.2 Iron cells	19
3.3.3 Labs	19
3.3.4 Equipment lists	20
3.3.5 Radioactive wastes	21
3.3.6 Auxiliaries	25
3.3.7 Radiation monitors	27
3.4 Facility layout plan	28
3.5 Component design description	36
3.5.1 Machines for specimen preparation	36
3.5.2 Testing machines for mechanical properties	38
3.5.3 Observation equipment	41
3.5.4 Microstructure observation device	42
3.5.5 Testing machines for graphite specimens	43
3.5.6 Instruments for LBE analysis	44

3.5.7 Other equipment	45
3.5.8 Equipment for RI separation and purification	46
4. Construction plan	47
5. Summary	47
Acknowledgments	48
References	48

1. 施設の目的、機能及び基本構成

1.1 施設の目的

日本原子力研究開発機構（JAEA）は、原子力発電に伴い発生する高レベル放射性廃棄物の減容化・有害度低減のため、加速器を使った核変換の研究開発として加速器駆動システム（ADS; Accelerator-Driven Systems）の開発を進めている。JAEAが提案しているADS¹⁾では、核破砕ターゲットと未臨界炉心の冷却材に鉛ビスマス共晶合金（LBE; Lead-Bismuth Eutectic）を用いる。ADSの構造材候補材について、LBE流動下での照射データや知見を得る目的で核変換工学実験施設（TEF-T）が検討されていた²⁾。現在は、このTEF-Tを基本設計とした陽子照射施設の検討を進めている。この陽子照射施設では、ADSを始めとする原子力システムや大強度加速器施設における材料の照射効果を研究する。また、陽子照射施設では陽子ビームや発生する核破砕中性子を用い、半導体ソフトエラー試験、医療用RI製造、陽子ビーム利用などを行う計画である。

本照射後試験（PIE; Post Irradiation Examination）施設は、陽子照射施設に附属する施設であり、その目的は、(1) 高エネルギー陽子/核破砕中性子照射材（以降、核破砕環境照射材）の照射後試験と(2) 製造されたRIの分離精製である。次にこれらの概要を述べる。

(1) 核破砕環境照射材の照射後試験

核破砕環境照射材の特徴は水素やヘリウムなどの核変換ガスの生成量が多いことが挙げられる。また材料の種類や使用環境（≡試験条件）も従来の軽水炉、高速炉や核融合炉とは異なる。そのため、ADSや大強度加速器施設の設計や寿命評価のために、核破砕環境照射材の材料照射データベースを新たに構築する必要がある。特にADS材料に関しては、LBE中での機械特性試験や放射化したLBEの分析などが必要とされるが、既存の照射後試験施設ではこれらに対応することは難しい。そこで本施設では、これらに対応した設備、装置類を備え、陽子照射施設やJ-PARCの他の加速器施設ならびに国内外の照射施設で照射された機器、試料から作製した試験片について照射後試験を実行し、照射後試験データの収集及び管理を行うことを目的とする。

(2) 陽子照射施設で製造されたRIの分離精製

様々な核種について加速器による製造が検討されているが、陽子照射施設において製造する医療用RIとしては、 α 放射体であるAc-225が最も有力であると考えられる。ここではAc-225を対象として検討することとする。海外では、カナダの加速器施設（TRIUMF）で照射したTh-232標的をアメリカのBNL（Brookhaven National Laboratory）のホットセルでAc-225を分離精製した実績がある。本施設では、陽子照射施設で照射したTh-232標的からAc-225を分離精製することを目的とする。

1.2 施設へのニーズ

陽子照射施設のユーザーコミュニティ（UC）等を通じて集約したPIE施設へのニーズとその対応をTable 1.1～1.2に示す。本施設では、これらのニーズに可能な限り対応していく予定である。

Table 1.1 Needs and response in the field of material irradiation.

ニーズ	対応
国際協力(RaDIATE等)	海外研究者の利用、試料の受け入れを可能とする（ただしRI施設とする必要がある）。
カプセル・試料の加工整備	陽子照射施設の試験片作製セルでカプセルの解体、試験片加工共に可能とする。
先端評価設備	PIE 施設では最先端の試験装置や分析機器等を設置する予定。
ヘリウム、トリチウム研究	PIE 施設では高分解能の四重極質量分析器付きガス分析装置を設置する予定。
放射化物の廃棄	放射化物の性状に応じ適切に保管・廃棄できるように廃棄物系を設計する予定。
ソフト面（解析・分析・放射化物保守など支援人材の育成等）	重要な課題と考える。人材育成は今後の課題。
J-PARC 各施設の標的、ビーム窓の受け入れ	陽子照射施設のターゲットメンテナンスセルで受け入れ可能とする。
標的・ビーム窓から試験片の切り出し	陽子照射施設の試験片作製セル、PIE 施設のセルいずれでも可能とする。
JAEA 内の照射後試験施設（RFEF、NUCEF、WASTEF、バックエンド）との連携	軽水炉材料などは RFEF、WASTEF などへ所内輸送し、照射後試験を実施する予定（ただし RI 施設とする必要がある）。
放射光実験・J-PARC 中性子実験への展開	RI 対応可能な実験施設への輸送は可能とする（ただし RI 施設とする必要がある）。
世界の加速器材料照射研究のハブとしての役割	そのような役割を果たせることを目指す。
照射機会の提供・照射後試験の実施	多くのユーザーに照射・照射後試験の機会を提供したい。ユーザーサポートの体制は今後の課題。
海外への試料輸送	対応可能とする（ただし RI 施設とする必要がある）。
異分野からの共同研究の受け入れ	軽水炉、核融合材料の照射は可能。照射後試験も一部可能とする。

Table 1.2 Needs and responses in the RI production field

ニーズ	対応
Ac-225 製造	Th-232 標的の解体を対応可能とするため、PIE 施設には α セルを設置する予定。
Ac-225 製造の化学手法	BNL と同様に α セルで分離精製を行う。具体的な手法については今後も調査を継続する。

1.3 施設の機能

以下にPIE施設の目的ならびにPIE施設へのニーズに対応した施設の機能を示す。

(1) 加速器照射材の照射後試験

この施設における照射後試験の対象とするのは陽子照射施設やJ-PARCの他の加速器施設ならびに国内外の照射施設で照射された機器、試料から作製した試料である。これらの試料

に対して以下の機能を持つことが要求される。

- 1) 照射済み試料の受け入れ
- 2) 試験片の製作・加工
- 3) 施設内での試験片管理
- 4) 照射後試験実行
- 5) 試験片の保管
- 6) 廃棄物の管理

これらについては**3.1.3**で詳細に述べる。

(2) 陽子照射施設で製造されたRIの分離精製

この施設におけるRIの分離精製の対象とするのは陽子照射施設で照射されたTh-232標的である。この標的に対して以下の機能を持つことが要求される。

- 1) Th-232標的の受け入れ
- 2) 容器の解体、標的取出し
- 3) 施設内での標的管理
- 4) 分離、精製実行
- 5) RIの輸送
- 6) 廃棄物の管理

これらについては**3.1.4**で詳細に述べる。

1.4 施設の基本構成

本PIE施設は、放射化した照射済み試料やRIを遠隔で取り扱えるように設計されたホットセル施設である。その機能には、破壊検査（機械的試験や金属組織観察など）、非破壊検査（表面観察、寸法測定、ガンマ線測定など）ならびにRIの分離精製が含まれる。

PIE施設の建物内には、非管理区域と放射線管理区域があり、非管理区域には居室（会議室、トイレ、通路、給湯室など）、放射線管理室、出入り管理室、コントロール室、電気室、非常用電源室、コールド機械室、コールドモックアップ室及びトラックヤードが含まれる。放射線管理区域には操作室/サービスエリアに隣接してコンクリートセル、鉄セル、固体廃棄物保管庫、実験室（以下ラボ、グローブボックスやフードを含む）、ホットモックアップ室、マスタースレーブマニピュレータ（MSM）メンテナンス室、気体廃棄物処理系を含むホット機械室及び液体廃棄物処理系が含まれる。施設の基本構成をFig. 1.1に示す。

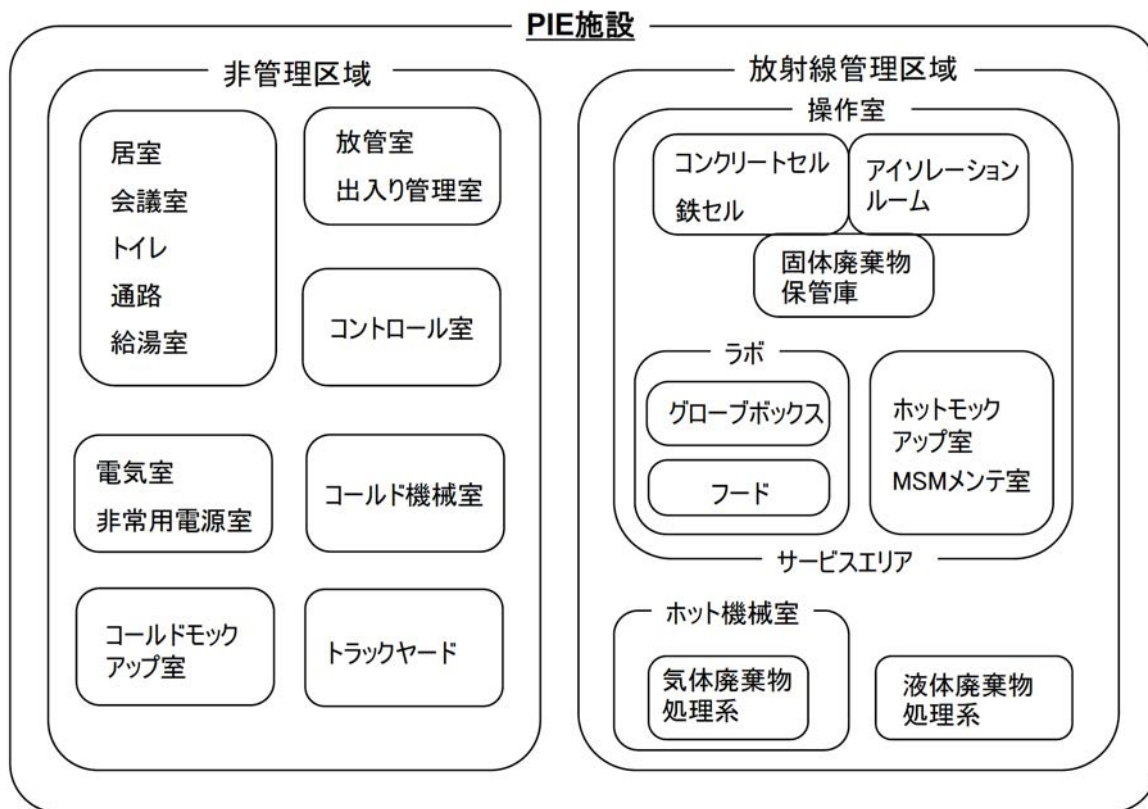


Fig. 1.1 Basic configuration of the PIE facility.

2. 施設の設計条件

PIE施設の主要な設計条件として以下の5つが挙げられる。

- ①建設予定地
- ②建家の面積
- ③陽子ビーム照射施設からの照射済み試料搬入経路
- ④照射済み試料、医療用RIや固体廃棄物の搬入・搬出経路
- ⑤液体廃棄物回収ラインの位置

PIE施設の設計や配置検討にあたっては、これらの5条件を考慮することとする。

① 建設予定地

建設予定地は、Fig. 2.1に示す陽子ビーム照射施設北側に隣接する東西約61 m、南北約43 m (2,623 m²) の敷地とする。この敷地のTPは8.0 mである。

② 建家の面積

建家の地上部面積は、Fig. 2.1に示すように上記敷地の境界から5.5 m下がった50 m × 32 m (1,600 m²) とする。

③ 陽子ビーム照射施設からの照射済み試料搬入経路

陽子照射施設の試料作製セルで製作された試験片は、地下トンネルを経由して搬入する。

④ 照射済み試料、医療用RIや固体廃棄物の搬入・搬出経路

J-PARCの他施設からの照射済み試料はトラックヤードより搬入する。また、他のPIE施設へ輸送する試料、医療用RI及び廃棄物はトラックヤードより搬出する。敷地東側の道路は北へ向かって上り坂で敷地北側道路は建設予定地より高所となる。そのためトラックの敷地への入口は南東角部付近に限られる。

⑤ 液体廃棄物回収ラインの位置

液体廃棄物を回収するタンクローリーの敷地への入口は④と同様、南東角部付近に限られる。タンクローリーと接続する回収ラインの位置は、建家南側とする。

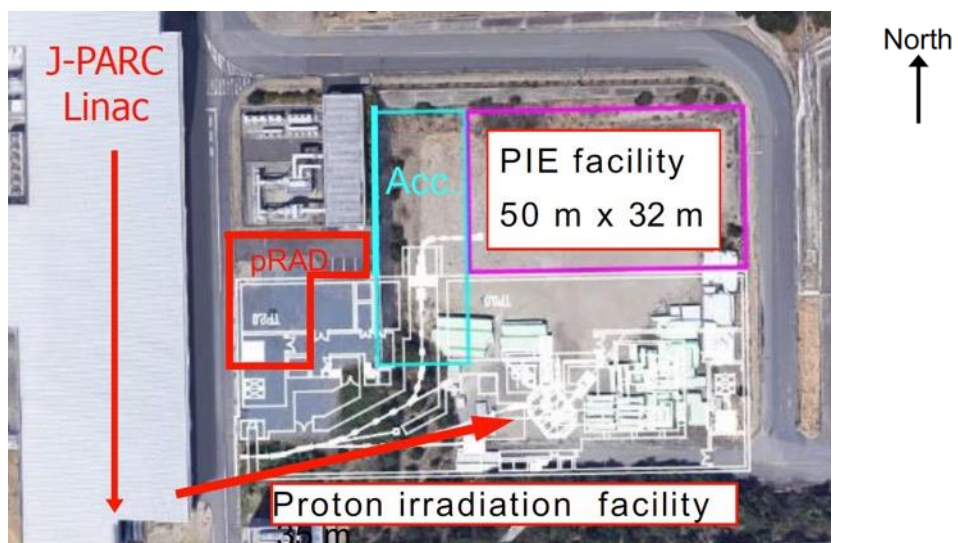


Fig. 2.1 Proposed construction site for the PIE facility.

3. 施設設計

3.1 取扱い対象となる試料

本PIE施設において取扱い対象となる試料は、照射後試験を行う照射済み試料と医療用RIである。照射後試験の対象となる試料は、以下の通りである。

- ・陽子照射施設のターゲット先端部
- ・陽子照射施設のターゲット内に装荷された照射試料板
- ・陽子照射施設の陽子ビーム入射窓
- ・陽子照射施設で照射された LBE
- ・陽子照射施設のターゲット外で照射した加速器・核融合炉・原子炉材料
- ・J-PARC の他の加速器施設で照射された機器、試料
- ・国内外の照射施設で照射された機器、試料

これらの照射済み試料の数を評価して、一定期間内に照射後試験を実行できるよう施設を設計する。医療用RIの製造では、トリウム (Th-232) 標的を照射してAc-225を製造する。本施設では照射後のトリウム標的を解体し、Ac-225の分離精製を行う。製造されるAc-225量を評価し、一定期間内に分離、精製できるよう施設を設計する。

3.1.1 陽子照射施設からの試料

陽子照射施設からの照射済み試料の多くは、陽子照射施設内の試料作製セルにおいて試験片形状に加工されたものである。Fig. 3.1.1に陽子照射施設ターゲット内の照射試料板の配置を示す。8枚の照射試料板がターゲット内に装荷され、それぞれからFig. 3.1.2で示された試験片が切り出される。各機械的試験に必要な試験条件と試験片枚数は、Table 3.1.1及びTable 3.1.2に示す。参考文献2)によれば、3~7 dpa/サイクル、3サイクルの照射で最大20 dpaの照射量を得られる。また、各表面観察の試験片形状・寸法、観察目的ならびに試験片数をTable 3.1.3に示す。微細組織観察及びガス分析の試験片形状・寸法、観察目的ならびに試験片数をTable 3.1.4に示す。

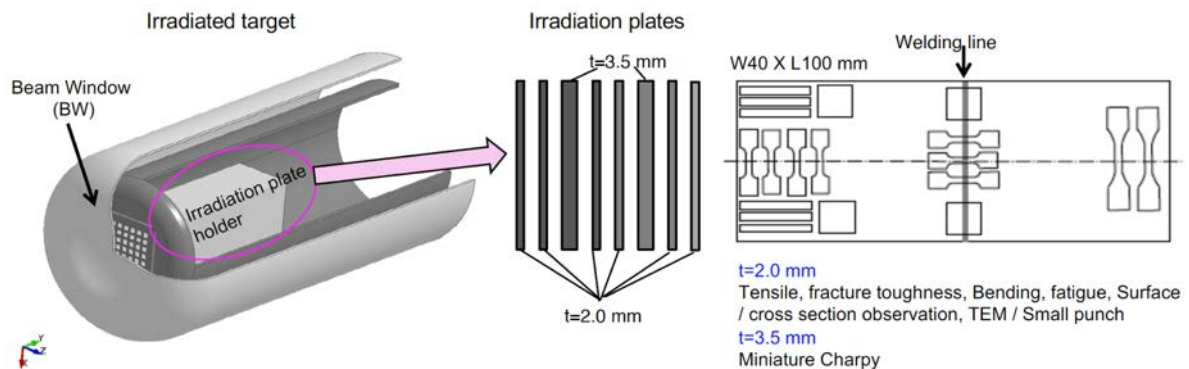


Fig. 3.1.1 Arrangement of irradiated plates in the proton irradiation facility target.

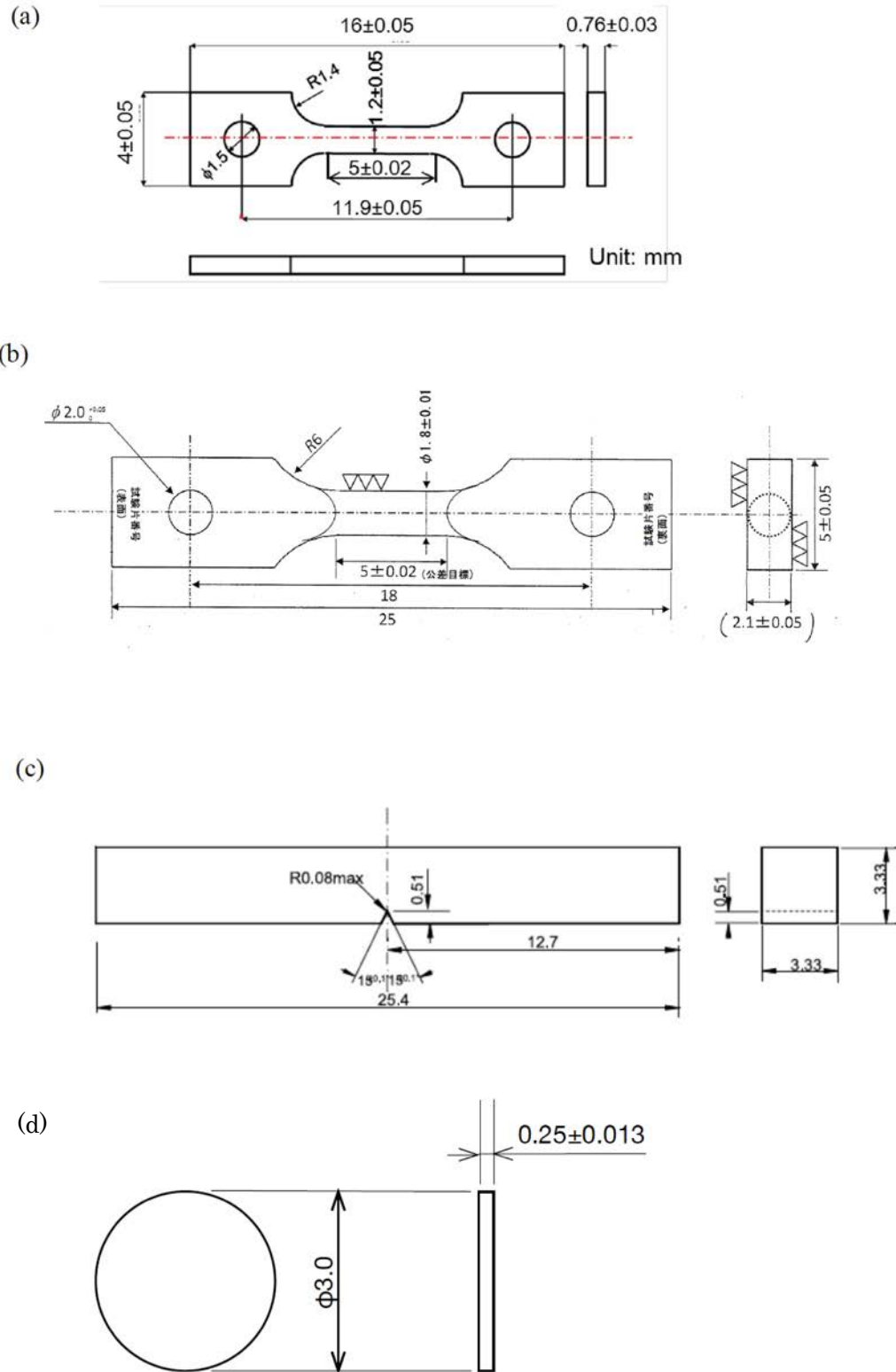


Fig. 3.1.2 Drawings of (a) SS-J3 tensile, (b) fatigue, (c) 1/3 size Charpy and (d) SP specimen.

Table 3.1.1 Specimen shape and dimensions, irradiation dose range, testing atmosphere, testing temperature, and number of specimens for each test item (including tests in LBE).

試験	試験片 形状寸法	照射量範囲	雰囲気	試験温度	試験片数
引張り 試験	平板 (SS-J3)	高照射量 (14-20 dpa) 中照射量 (7-14 dpa) 低照射量 (-7 dpa)	不活性 ガス	T _{irr} *	36枚以上 (各照射量範囲 6枚以上×3×2条件)
			LBE	T _{irr}	
SSRT** 試験	平板 (SS-J3)	中照射量 (7-14 dpa) 低照射量 (-7 dpa)	不活性 ガス	T _{irr}	16枚以上 (各照射量範囲 4枚以上×2×2条件)
			LBE	T _{irr}	
疲労 試験	円柱型	中照射量 (7-14 dpa) 低照射量 (-7 dpa)	不活性 ガス	T _{irr}	36本以上 (各照射量範囲 9本以上×2×2条件)
			LBE	T _{irr}	
クリープ 試験	円柱型	中照射量 (7-14 dpa) 低照射量 (-7 dpa)	不活性 ガス	T _{irr}	24本以上 (各照射量範囲 6本以上×2×2条件)
			LBE	T _{irr}	

*: Irradiation temperature

** : Slow strain rate tensile test

Table 3.1.2 Specimen shape and dimensions, irradiation dose range, testing atmosphere, testing temperature, and number of specimens for each test item (no test in LBE).

試験	試験片 形状寸法	照射量範囲	雰囲気	試験 温度	試験片数
シャルピー 衝撃試験	3.3 mm角	中照射量 (7-14 dpa) 低照射量 (-7 dpa)	大気中	-196°C -250°C	20本以上 (各照射量範囲 10本以上×2)
SP*試験	φ3.0 mm 4.0 mm角	高照射量 (14-20 dpa) 中照射量 (7-14 dpa) 低照射量 (-7 dpa)	大気中	-196°C -250°C	36枚以上 (各照射量範囲 12枚以上×3)
硬さ試験	樹脂埋め 試料	高照射量 (14-20 dpa) 中照射量 (7-14 dpa) 低照射量 (-7 dpa)	大気中	室温	試験片掴み部や残 材より必要数作製
ナノインデ ンテーション	樹脂埋め 試料	高照射量 (14-20 dpa) 中照射量 (7-14 dpa) 低照射量 (-7 dpa)	大気中	室温	試験片掴み部や残 材より必要数作製

*: Small punch

Table 3.1.3 Specimen shape and size, purpose of observation, and number of specimens for each surface observation.

観察	試験片形状寸法	観察目的	試験片数
光学顕微鏡 レーザー顕微鏡	3×7×2 mm	腐食表面観察	30枚以上（ビーム入射窓、照射試料板、その他）
金属顕微鏡	樹脂埋め試料	組織観察	機械強度試験片の一部（引張り、SSRT、疲労、クリープ、シャルピー、SP試験）
走査電子顕微鏡（SEM）	試験後試料	破面観察	機械強度試験片全数（引張り、SSRT、疲労、クリープ、シャルピー、SP試験）
電界放出型走査電子顕微鏡（FE-SEM）	樹脂埋め試料	腐食断面観察 元素分析	30枚以上（ビーム入射窓、照射試料板、その他）

Table 3.1.4 Specimen shape and size, purpose of observation, and number of specimens for microstructural observation and gas analysis.

観察	試験片形状寸法	観察目的	試験片数
透過型電子顕微鏡（TEM）	電解研磨、FIB*で作製	微細組織観察	30枚以上
ガス分析	1枚当たり 10 mg以上	核変換生成ガスの定量	試験片掴み部や残材より必要数作製

*: Focused ion beam

次に、陽子照射施設の陽子ビーム窓の試験項目などを Table 3.1.5 に示す。陽子ビーム窓は厚さ 1.5 mm の Al 合金（A5083）薄板 2 枚で構成され、これらの間を冷却水が流れる構造である。陽子ビーム窓は 2 年に 1 回の頻度で交換され、φ50 mm×1.5 mm の試料が切り出される。

Table 3.1.5 Testing items, specimen shape and dimensions, irradiation dose range, test atmosphere, test temperature, and number of specimens for the proton beam window.

試験	試験片形状寸法	照射量範囲	雰囲気	試験温度	試験片数
引張り試験	平板（SS-J3）	TBD	不活性ガス	T _{irr}	16枚以上 （各窓8枚以上×2）
ナノインデンテーション	樹脂埋め試料	TBD	大気中	室温	試験片掴み部や残材より必要数作製

また、陽子照射施設で照射された LBE の分析試験項目を Table 3.1.6 に示す。ターゲットループの数カ所から採取した LBE を分析し、LBE に固溶あるいは析出した放射性元素の分布を知ることが出来る。

Table 3.1.6 Analytical testing items for LBEs irradiated at proton irradiation facility.

分析	試験片量	得られる情報	試験片数
ガンマ線測定	数g以上	核種、量	運転毎に数カ所から試料採取
蒸散法	mgオーダー	蒸発挙動	運転毎に数カ所から試料採取
熱クロマトグラフィ	0.数g以上	吸着挙動	運転毎に数カ所から試料採取

3.1.2 その他のJ-PARC施設からの照射試料

J-PARC 各施設からの照射済み試料としては、物質・生命科学実験施設（MLF）、ニュートリノ及びハドロンを想定している。MLF の機器のうち水銀容器、陽子ビーム窓ならびにモデレータ容器は、MLF 内において φ50 の試料を切り出して陽子照射施設に輸送する。ミュオン標的とその他の施設の機器は陽子照射施設に輸送され、大型機器メンテナンス室において 40 × 40 mm または φ 40 mm の試料が切り出されると想定している。陽子照射施設の試料作製セルにおいて、これらの試料から試験片を作製することで、陽子照射施設からの試験片と同じ種類の試験を実行できる。J-PARC 各施設で照射後試験を予定している機器、材料と試験項目等を Table 3.1.7～3.1.9 にそれぞれ示す。

Table 3.1.7 に J-PARC MLF で照射後試験を予定している機器、材料と試験項目を示す。核破砕中性子源の照射後試験目的は、3 GeV 陽子、中性子照射環境にさらされた材料の力学特性変化を計測し、照射データを蓄積すると共に、核破砕中性子源構成機器（水銀標的、モデレータ・反射体及び陽子ビーム窓）の設計に反映する。その結果を反映し、合理的な寿命の決定、さらには廃棄物の削減を目指すことである。一方、ミュオン標的の照射後試験目的は、3 GeV 陽子照射環境にさらされた材料の力学特性変化を計測し、照射データを蓄積すると共に、合理的な寿命の決定、さらには廃棄物の削減を目指す。さらには、ガス生成量、放出量を定量化し、長期的な保守計画を立案することである。

Table 3.1.7 Components, materials and testing items planned for PIE (J-PARC MLF).

機器名	寸法	材料	試験項目	備考
水銀容器	φ50×2.5 mmt, 50 g	SUS316L	引張り、微少硬さ、表面観察、 TEM、ガス分析	4 個/年
陽子ビーム窓	φ50×2.5 mmt, 15 g	A5083	引張り、微少硬さ、表面観察、 TEM、ガス分析	2 個/2 年
モデレータ容器	φ50×2.5 mmt, 15 g	A6061-T6	引張り、微少硬さ、表面観察、 TEM、ガス分析	1 個/年
モデレータ容器	φ50×2.5 mmt, 15 g	A5083	引張り、微少硬さ、表面観察、 TEM、ガス分析	1 個/年
モデレータ容器	φ50×2.5 mmt, 17 g	Ag-In-Cd A5083	引張り、微少硬さ、表面観察、 TEM、ガス分析	1 個/年
ミュオン標的	φ40×20 mmt, 45 g	黒鉛	引張り、微少硬さ、表面観察、 TEM、ガス分析、熱拡散率測定、 寸法変化測定、超音波伝導測定	1 個/3 年
ミュオン標的	φ40×20 mmt, 80 g	SiC/SiC 複合材	引張り、微少硬さ、表面観察、 TEM、ガス分析、熱拡散率測定、 寸法変化測定、超音波伝導測定	1 個/3 年

Table 3.1.8 に J-PARC ニュートリノで照射後試験を予定している機器、材料と試験項目を示す。ニュートリノの照射後試験目的は、30 GeV 陽子照射環境にさらされたビーム窓材料やターゲットの力学特性変化を計測し、照射データを蓄積すると共に、合理的な寿命の決定、さらには廃棄物の削減を目指すことである。

Table 3.1.8 Components, materials and testing items planned for PIE (J-PARC Neutrino).

機器名	寸法	材料	試験項目	備考
ビーム窓	φ40×0.3 mmt, 1.8g	Ti-6Al-4V	微少硬さ、表面観察、TEM、 放射化学分析	2個/5年
OTR	φ50×50 μmt	Ti-15V-3Cr- 3Sn-3Al	微少硬さ、表面観察、TEM、 放射化学分析	2枚/5年
SSEM	2~5 mm ×5 μmt	Pure Ti	微少硬さ、表面観察、TEM、 放射化学分析	~10枚/5年
ターゲット	TBD	等方性グラフ アイト	TBD	1個/5年

Table 3.1.9にJ-PARCハドロンで照射後試験を予定している機器、材料と試験項目を示す。ハドロン照射後試験目的は、30 GeV / 8 GeV陽子照射環境にさらされたビーム窓材料や真空仕切り窓の力学特性変化を計測し、照射データを蓄積すると共に、合理的な寿命の決定、さらには廃棄物の削減を目指すことである。

Table 3.1.9 Components, materials and testing items planned for PIE (J-PARC Hadron).

機器名	寸法 (切出し前)	材料	試験項目	備考
50 kW 標的用 Ti 窓 (上流)	φ265×2~20 mmt, 3.3 kg	Ti-6Al-4V	引張り、微少硬さ	1個/3年
50kW 標的用 Ti 窓 (下流)	φ440×4~24 mmt, 9.9 kg	Ti-6Al-4V	引張り、微少硬さ	
90kW 標的用 Be 窓 (上流)	φ300×6 mmt, 0.8 kg	純 Be (S-200F)	引張り、微少硬さ	1個/6年
90kW 標的用 Be 窓 (下流)	φ455×8 mmt, 2.4 kg	純 Be (S-200F)	引張り、微少硬さ	
SY 真空仕切り用 Al 窓 (2016 交換)	φ230×0.1 mmt, 11 g	純 Al (A1060-H18)	引張り、微少硬さ、 成分分析	
SY 真空仕切り用 Al 窓 (2018 交換)	φ260×0.1~35 mmt, 2.1 kg	Al 合金 (A7N01-T6)	引張り、微少硬さ、 成分分析	
COMET Phase 1.5 標的	φ20 mm× 400 mm, 400 g	SiC/SiC 複合材	引張り、微少硬さ、 表面観察、TEM、 ガス分析、熱拡散率 測定	トータル 2 個
COMET Phase 2 標的	φ20 mm× 160 mm, 1 kg	W 合金	引張り、微少硬さ、 表面観察、TEM、 ガス分析、熱拡散率 測定	トータル 2 個

3.1.3 試験フロー及び各工程の詳細

Fig. 3.1.3に施設全体のフロー図を、Fig. 3.1.4～3.1.6に主要照射材（金属、LBE及び黒鉛）のPIEフロー図をそれぞれ示す。各工程の詳細について以下に述べる。

(1) 照射済み試料の受取

PIE施設には、他の施設との間で照射済み試料を送受するための設備が必要である。サービスエリアには、陽子ビーム照射施設に接続している地下トンネルのハッチがある。J-PARCの他施設、外部のPIE施設、大学等との照射済み試料送受や医療用RIの搬出はトラックヤードを通じて行う。その際、試料の情報（容器に含まれる各試験片の#ID番号、材質、寸法、重量、放射能など）と試験計画（各試験片の試験パラメータ、試験の種類、優先順位、試験条件（温度など））、試験データの取扱いなどに関する情報も併せて受け取る。

(2) 試験片の製作・加工

受け入れた照射済み試料から試験片を製作・加工を行う。ターゲット等の機器から切出した試料やターゲット内に装荷された照射試験板からの試験片製作の大半は、陽子照射施設内の試料作製セルで行われる。PIE施設では、主に以下の製作・加工を行う。

- ・角断面の試験片から丸断面の疲労試験片の作製
- ・試験済み試験片から金相観察、硬さ試験用試料の作製
- ・試験済み試験片から SP 試験片、微細組織観察用試験片の作製

(3) 施設内の試験片管理

各試験片の存在場所、状態に関連するデータの管理と登録を行う。全てのセルで、試験片を識別し、その照射データ、試験の実施状況、今後の移送先等の情報等を知ることが可能とする。

(4) 金属材料試験片の PIE

Fig. 3.1.4に金属材料試験片のPIEフロー図を示す。金属材料試験片のPIEには、機械強度試験、破面観察、金相観察、ガス分析ならびに微細組織観察などが含まれる。機械強度試験の一部はLBE中で実施する必要がある。

(5) 液体金属試料の PIE

Fig. 3.1.5に液体金属試料のPIEフロー図を示す。液体金属試料のPIEは、LBEループより採取した放射化LBEに対して実施するもので、運転中に生成した放射性の核破砕反応生成物（SP）や放射化した腐食生成物（CP）の挙動を知ることが目的である。これらの知見はADSプラント運転時や保守時における廃棄物量の推定や被曝低減に重要である。分析を行うためにはLBEの前処理が必要である。

(6) 黒鉛材料の PIE

Fig. 3.1.6に黒鉛材料のPIEフロー図を示す。黒鉛材料のPIEは、ミュオンターゲットから採取した照射試料に対して実施する。試験片を製作するため切断機と機械加工機が必要である。試験は、圧縮試験、熱拡散率測定、密度測定などを行う。

(7) PIE 結果の報告

PIE結果は試験依頼者に報告されると共に、核破砕環境照射材データベースへ登録される。

試験報告書には、各試験片のID番号に対し、試験実施日、時間、期間、試験機#ID、オペレーターの氏名など一般的な情報に加え、各試験片の試験条件（温度、雰囲気など）、試験結果、生データなどが含まれる。

(8) 試験片の保管

試験を終えた試験片は、専用の場所に保管される。保管ピットのあるByセル1に試験片を搬入し、個別の保管容器に収納して保管ピットに保管する。

(9) 廃棄物の処理

試験を終えた試験片や試験片の製作・加工や試験中に生じる廃棄物は、それぞれの性状によって適切に処理される。所定の期間保管した後、各々の廃棄物は原子力科学研究所（原科研）の廃棄物処分場へ搬出される。

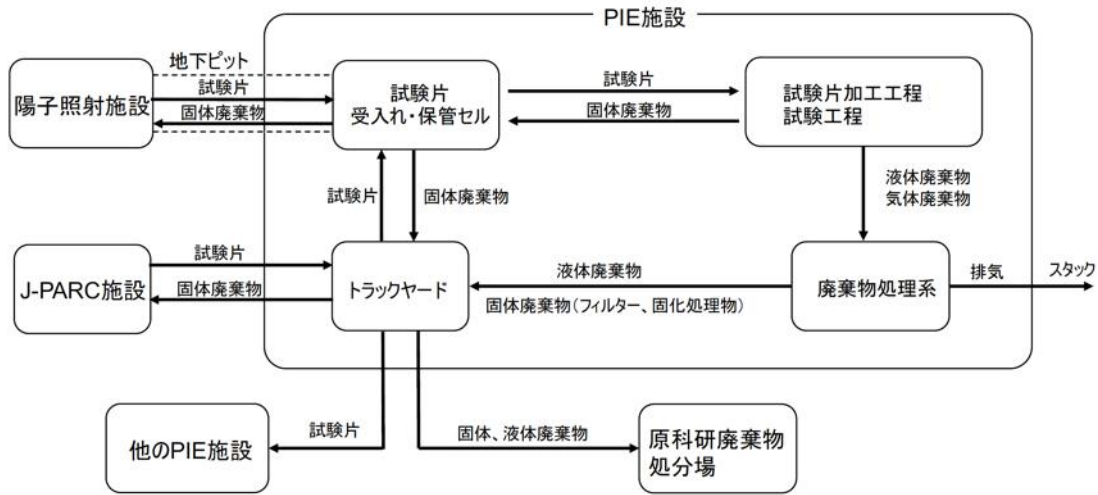


Fig. 3.1.3 PIE facility process flow diagram.

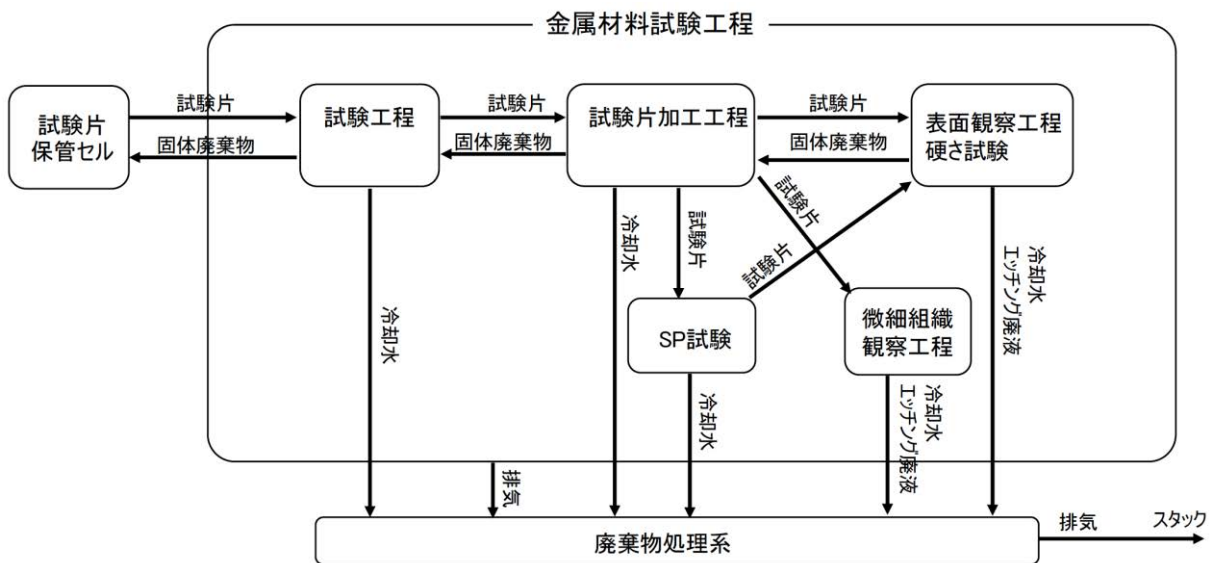


Fig. 3.1.4 Process flow diagram for PIE of metal specimens.

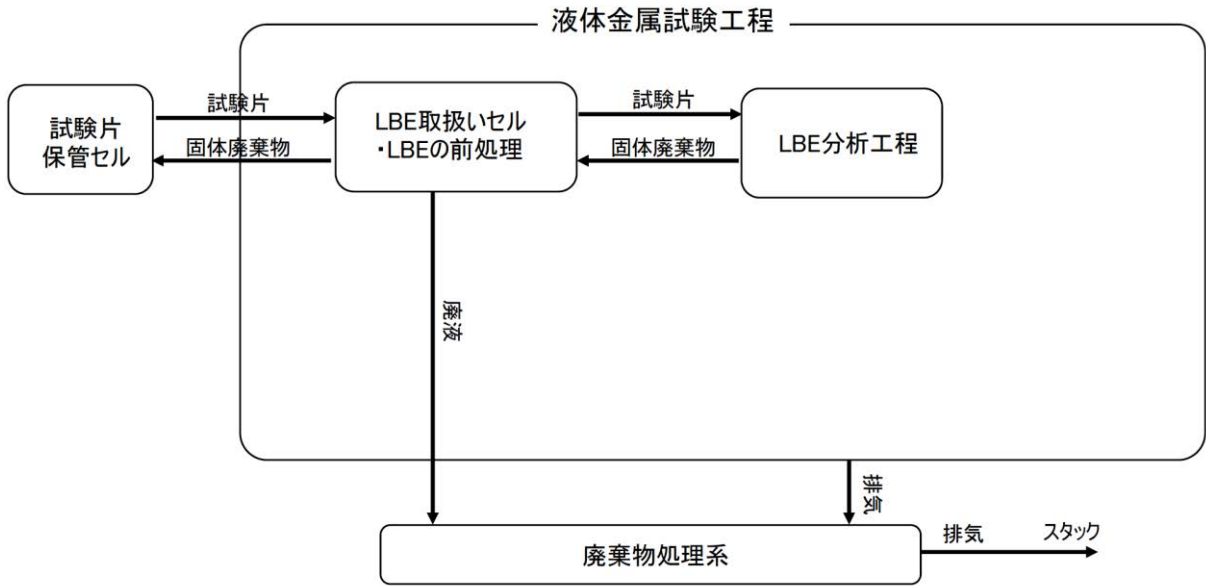


Fig. 3.1.5 Process flow diagram for PIE of LBE specimens.

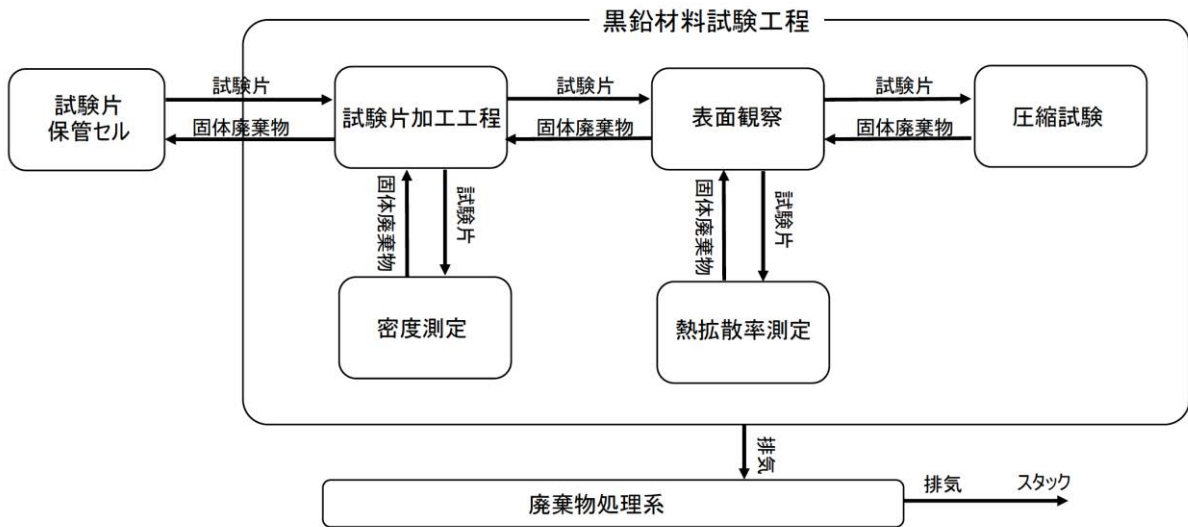


Fig. 3.1.6 Process flow diagram for PIE of graphite specimens.

3.1.4 RI の分離精製

本施設では、陽子照射後のトリウム標的からAc-225の分離精製を行う。工程は以下の通りである。また、Fig. 3.1.7にRIの分離精製フロー図を示す。

(1) Th-232標的の受け入れ

PIE施設では、陽子照射施設からのTh-232標的を受け入れる。その際、標的の情報（容器に含まれる標的の#ID番号、材質、寸法、重量、照射履歴、放射能など）も併せて受け取る。

(2) 容器の解体、標的取出し

受け入れた容器を解体、標的の取出しを行う。

(3) 施設内での標的の管理

受け取った標的について、施設内の適切な場所に分離精製を実行できる状態で管理する。また、Ac-225を他の施設に輸送できるように配慮した設計とする必要がある。

(4) 分離精製(詳細は3.5.8)

Fig. 3.1.7に示すとおり、Th標的の溶解、RaとAcの分離、Raの抽出、Ra-225から崩壊したAc-225の抽出、放射能測定と質量測定、容器封入を行う。

(5) 報告書の作成

作業結果は依頼者（製薬メーカー）に報告される。作業報告書には、各標的の情報として、各ID番号に対して、作業日、時間、期間、装置#ID、オペレーター氏名など一般的な情報に加え、重量、放射エネルギーが含まれる。

(6) RI の輸送

容器封入したAc-225を輸送容器に入れ、製薬メーカーへ輸送する。

(7) 廃棄物の管理

分離精製作業中に生じる廃棄物は、それぞれの性状によって適切に処理される。所定の期間保管した後、各々の廃棄物は原科研の廃棄物処分場へ搬出される。

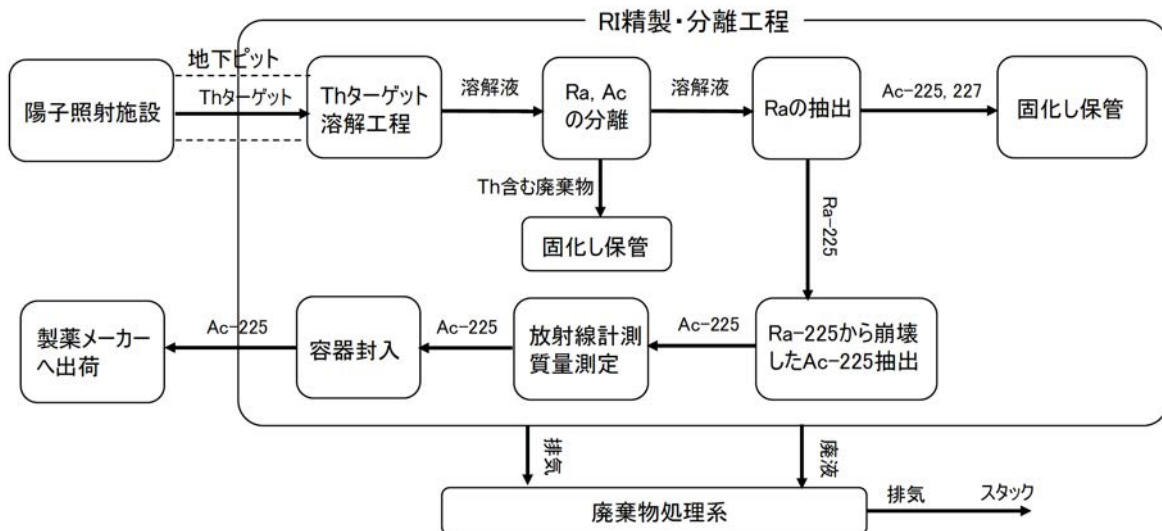


Fig. 3.1.7 Process flow diagram of Ac-225 production.

3.2 遮蔽厚さの検討

3.2.1 コンクリートセルの遮蔽厚さ

参考文献2)によると、陽子照射施設における試験片作製セルのコンクリート壁の厚さは、最も放射能の大きな部材であるターゲット容器（照射試験板含む）で決定された。5,000時間運転後、30日経過時の放射能は 1.26×10^{14} (Bq)であり、遮蔽壁外側の線量を制限値である $25 \mu\text{Sv/h}$ 以下とするのに必要な壁厚は1,500 mmと計算された。試験片への加工は約1年程度の冷却期間後に実施されるため、本PIE施設の試験片受入れ保管セルに搬入される最大の放射能は約一桁下がり 3.39×10^{13} (Bq)となり、必要な壁厚は約1,200 mmとした。一方、試験を行うセルでは、試験片の一枚当たりの放射能は大きさにもよるが 10^{10} (Bq)のオーダーである。一時的にセル内に存在する試験片は、試験中や試験後の試験片、セル内を通過する試験片など合計10～20枚以下と考えられる。従って放射能は 10^{12} (Bq)以下であり、必要な壁厚は約900 mmとした。

3.2.2 鉄セルの遮蔽厚さ

鉄セルで試験を行う試験片は、コンクリートセルで機械強度試験を実施した試験済み試験片をさらに切断して小さくしたものである。破面観察用はゲージ部のみ、金相・硬さ試験用は掴み部のみである。また、セル内を通過する試験片も少なくなるため、放射能は大きさにもよるが 10^{10} (Bq)のオーダーである。コンクリートの場合、必要な壁厚は約450 mmであり、鉄の密度はコンクリートの約3倍あるため、鉄遮蔽の厚さは150 mmとした。

3.2.3 グローブボックス内機器の追加遮蔽

グローブボックスには遮蔽能力はほとんど無い。必要に応じグローブボックス内に設置する装置、分析機器類の試料周りに鉛等の遮蔽を追加する。遮蔽の厚さは試料の量によって異なるため、個々の試験装置毎に検討する必要がある。

3.3 設備設計の概要

3.3.1 コンクリートセル

コンクリートセルにはβ_Yセルとα_Yセルがある。β_Yセルは完全な気密構造ではなく、内壁もコンクリートに塗装のみである。α_Yセルは気密構造であり、α_Y放出核種を非密封で取り扱える。内壁も除染が容易であるようにステンレス製内張が施される他、物品の出し入れもパスボックスを介して行う。β_Yセルはβ-1～β-6の6基あり、試料の搬出入と保管、試験片加工ならびに機械的特性試験が実行される。α_Yセルはα-1の1基のみであり、RIの分離精製が実行される。Table 3.3.1に各セルの役割と設置される機器類の一覧を示す。各セルには、1つの遮蔽窓と1対のマニピュレータから構成されるワークステーションが設置される。ワークステーションのマニピュレータは容量20 kg程度で、電動化や自動制御に対応可能なものとする。各セルの天井には容量1トン程度のパワーマニピュレータが設置され、試験器類の移動に使用する。背面には遮蔽扉が設置され、アイソレーションルームに通じている。また、各β_Yセル間には試料移送ポートが設置され、試料等の移動が可能である。

セルの内寸は、β-1セルがW 7.5 m × D 3.5 m × H 4.5 m、β-2～6セルがW 4.5 m × D 3.5 m × H 4.5 mならびにα-1セルがW 7.0 m × D 2.3 m × H 4.5 mである。

Table 3.3.1 Functions and equipment of each concrete cell.

セル No.	役割	遮蔽窓	マニピュレータ (20 kg)	パワーマニピュレータ (1 t)	背面遮蔽扉	天井ハッチ	アイソレーションボックス	備考
β-1	試験片の搬出入と保管	3	6	1	1	1	-	保管ピット
β-2	引張り試験	2	4	1	1	1	-	
β-3	疲労試験	2	4	1	1	1	-	
β-4	クリープ試験	2	4	1	1	1	-	
β-5	シャルピー衝撃試験、SP試験	2	4	1	1	1	-	
β-6	試験片加工	2	4	1	1	1	-	
α-1	RIの分離精製	3	6	1	1	1	1	気密構造、ステンレス製内張
合計		16	32	7	7	7	1	

※メンテナンス体制

セル内の汚染された機器類のメンテナンスを行う際には、セル背後の遮蔽扉よりアイソレーションルームへ搬出する。除染が可能である場合は、ホットモックアップ室へ移送してメンテナンスを行う。除染が難しい場合は、アイソレーションルーム内でメンテナンスを行う。

マニピュレータなどのリモートハンドリング機器のメンテナンスは、β_Yセルの場合、操作室天井のクレーンまたはチェーンブロックを利用して操作室側へ引き抜き、マニピュレータメンテナンス室へ移送してメンテナンスを行う。α_Yセルの場合は、天井からアイソレーションボックスへ引き抜き、アイソレーションボックス内でメンテナンスを行う。

3.3.2 鉄セル

鉄セルはF-1～F-4の4基設置される。鉄セルでは機械的特性試験後の試験片について破面観察や金相観察ならびに鉛ビスマスループからのLBE試料の調整を行う。Table 3.3.2に各セルの役割と設置される機器類の一覧を示す。各セルには、2つの遮蔽窓と1対のマニピュレータから構成されるワークステーションが設置される。ワークステーションのマニピュレータは容量10 kg程度で、電動化や自動制御に対応可能なものとする。また、各セル間にはハッチ等が設置され、試料等の移動が可能である。セルの内寸は、W 4.0 m × D 3.0 m × H 3.0 mである。

Table 3.3.2 Functions and equipment of each iron cell.

セル No.	役割	遮蔽窓	マニピュレータ (10 kg)	背面遮蔽扉	備考
F-1	硬さ試験、ナノインデンテーション	2	4	1	
F-2	破断面観察、組織観察	2	4	1	
F-3	断面観察、分析	2	4	1	
F-4	LBE試料の調整	2	4	1	
合計		8	16	4	

3.3.3 ラボ

ラボは6室あり、微細組織観察、薬品類の準備、LBE試料の分析ならびに炭素材料等の照射後試験を行う。Table 3.3.3に各セルの役割と設置される機器類の一覧を示す。ラボの内寸は、L-1～2がW 3.0 m × D 4.0 m × H 5.0 m、L-3～6がW 4.0 m × D 6.0 m × H 6.0 mである。

Table 3.3.3 Functions and equipment of each laboratory.

ラボ No.	役割	フード	グローブボックス	備考
L-1	微細組織観察	1	-	TEM、FIB、電解研磨
L-2	化学実験準備室	2	-	金粗観察用エッチング液の準備とモックアップ試験、LBE試料調整用の薬品準備
L-3	LBE分析	1	4	蒸散法、熱クロマトグラフィ
L-4	黒鉛試験、ガス分析	-	4	熱拡散率測定、密度測定、電気炉・四重極質量分析器
L-5	ホットモックアップ	-	-	セル、グローブボックス内装置の保守、改造など。天井ハッチ
L-6	ホットモックアップ	-	-	セル、グローブボックス内装置の保守、改造など。天井ハッチ
合計		4	8	

3.3.4 設備リスト

セル、ラボ以外のクレーンのリストを Table 3.3.4 に、ハッチ、シャッターのリストを Table 3.3.5 及び地下トンネル関連機器設備のリストを Table 3.3.6 にそれぞれ示す。

Table 3.3.4 List of cranes.

クレーン種別	設置場所	荷重	用途	備考
天井クレーン	サービスエリア	30 t (主巻)	遮蔽ハッチの移動	
		5 t (補巻)	キャスク等の移動	
天井クレーン	操作室	1 t	マニピュレータの引抜き、移動	
ホイストクレーン	ローディングドック	3 t	ホット機械室の機器類搬出入	
ホイストクレーン	居室 3 階東側壁	3 t	コールド機械室の機器類搬出入	

Table 3.3.5 List of hatches and shutters.

シャッター種別	設置場所	寸法	用途	備考
天井ハッチ	サービスエリア/トラックヤード	TBD	キャスク、機器類の搬出入	
ハッチ	サービスエリア/ホット機械室	TBD	ホット機械室の機器類搬出入	
電動シャッター	トラックヤード/建屋外	TBD	キャスク、機器類の搬出入	
電動シャッター	操作室/建屋外	TBD	操作室の機器類搬出入	
電動シャッター	ホット機械室/ローディングドック	TBD	ホット機械室の機器類搬出入	
電動シャッター	居室 2 階東側/建屋外	TBD	コールド機械室の機器類搬出入	
電動シャッター	居室 3 階東側/建屋外	TBD	コールド機械室の機器類搬出入	

Table 3.3.6 List of equipment and facilities related to underground pit.

機器種別	設置場所	寸法/ 耐荷重等	用途	備考
気密ハッチ	サービスエリア/ホット機械室	W 2.0 m × D 3.0 m	キャスクの搬出入	
気密ハッチ	ホット機械室/地下トンネル	W 2.0 m × D 3.0 m	キャスクの搬出入	
電動キャスク 運搬車両	地下トンネル内	3 t	陽子照射施設からキャスクの運搬	
車両走行用レール	地下トンネル内	TBD	運搬車両の走行用	
電源供給設備	地下トンネル内	TBD	運搬車両の電源供給	

3.3.5 廃棄物処理設備

(1) 固体廃棄物処理設備

本施設で発生する固体廃棄物は、試験済みの試験片、分析済みの LBE、固化処理した液体廃棄物、汚染した試験装置類、実験器具類、ウエス、ビニールシートなどがある。これらは原子力科学研究所のルールに従って分類し、原科研の廃棄物処分場へ輸送するまでの期間、一時保管する。一時保管場所は、線量や性状などに応じて B-1 セルの保管ピット、B-1 セル隣りの固体廃棄物保管室ならびにサービスエリア内に設けられた固体廃棄物保管エリアとする。

固体廃棄物処理設備は、次のような方針で設計を行う。

- (1) B-1セルの保管ピットは、本施設から発生する試験済みの試験片、分析済みの LBE など線量の高い固体廃棄物を保管するための十分な貯蔵容量及び遮蔽壁を有する設計とする。
- (2) B-1 セル東側の固体廃棄物保管室は、本施設から発生する固化処理した液体廃棄物、汚染した試験装置類、実験器具類などある程度の線量を持ち体積の大きな固体廃棄物を保管するための十分な貯蔵容量及び遮蔽壁を有する設計とする。

保管ピットは B-1 セルの床に 20 基（4 行×5 列）設置される。保管ピットの仕様を Table 3.3.7 に示す。

Table 3.3.7 Specifications of storage pits.

項目	仕様	備考
型式	縦穴型コンクリートピット	
数量	20 基（4 行×5 列）	
内寸	直径：300 mm、深さ：3,000 mm	
内張	ステンレス	
遮蔽蓋	ステンレス製、重コンクリート厚さ：650 mm 鉛厚さ：150 mm、重量（未定） kg	
収納容器	ステンレス製（外径 250 mm、高さ 500 mm）	
収納本数	3 本/基	
放射線モニタ	無し	
雰囲気	空気循環（セル内と同雰囲気）	

固体廃棄物保管室は B-1 セルの東側に設置される。固体廃棄物保管室の内寸は、W 3.0 m × D 3.0 m × H 4.5 m である。

(2) 液体廃棄物処理設備

液体廃棄物処理設備は、本施設の管理区域で発生する排水を貯留・排出する設備である。発生した排水は、液体廃棄物廃棄設備に一時貯留した後、原子力科学研究所の排水溝へ排出又は原科研の放射性廃棄物処理場へ運搬して処理する。

液体廃棄物廃棄設備は、WASTEFを参考に次の設計方針に従い設計する。

- (1) 液体廃棄物廃棄設備は、液体廃棄物の性状及び放射能濃度に応じて、適切に貯蔵し、排出できる設計とする。
- (2) 液体廃棄物廃棄設備は、放射線防護のため適切な遮蔽を有する設計とする。
- (3) 廃液タンクは、本施設の運転に伴い発生する液体廃棄物を貯留することができる容量を有する設計とする。
- (4) 廃液タンクは、漏えいを防止する適切な設計とし、かつ、耐食性を考慮した設計とする。また、万一の漏えいを検知できる設計とする。
- (5) 廃液タンクを設置する区域は、液体廃棄物が区域外へ漏えいすることを防止できる設計とする。

本施設で発生する放射性廃液は、高レベル廃液、低レベル廃液、極低レベル廃液及びアルファ系（ α 廃液）の4通りに分類され、放射能と性状に応じた液体廃棄設備により処理を行う。各レベル廃液システムの概要をTable 3.3.8～3.3.11に示す。

Table 3.3.8 Specification of high-level liquid waste system.

設置場所	地下1階 高レベル廃液貯槽室
主な発生源	コンクリートセルB-1～6、鉄セルF-1～4、グローブボックス、フード、ラボL-1～4、B γ アイソレーションルーム、モニタ槽、 α 廃液移送系
構造及び材質	SUS304鋼板製
容量、数量	2 m ³ × 2基
処理場引き渡し方法	セル等から排出される廃液をモニタ槽（60 L）に一時貯留し、モニタ槽が満水（液面H警報：70%）になった時点で槽内廃液濃度を測定（NaIシンチレータ）し、その濃度に応じ高、低レベル廃液にクラス分けして、手動コントロールにより各廃液貯槽に移送し処理する。なお、クラス分けされた高レベル廃液は固化処理を行う。
警報設備	貯槽水位高、集水ピット高

Table 3.3.9 Specification of low-level liquid waste system.

設置場所	地下1階 低レベル廃液貯槽室
主な発生源	操作室、サービスエリア、ホット機械室
構造及び材質	SS鋼板製ゴムライニング
容量、数量	6 m ³ × 2基
処理場引き渡し方法	槽内廃液サンプリング後、規定濃度未満であることを確認し、タンクローリによる引き渡し。
警報設備	貯槽水位高、集水ピット高

Table 3.3.10 Specification for very low-level liquid waste system.

設置場所	地下1階 ホット機械室
主な発生源	更衣室、冷却水
構造及び材質	SS鋼板製エポキシ樹脂系塗装仕上げ
容量、数量	20 m ³ × 2基
処理場引き渡し方法	槽内廃液サンプリング後、規定濃度未満であることを確認し、一般排水する。
警報設備	貯槽水位高、集水ピット高

Table 3.3.11 Specification of α_Y liquid waste system.

設置場所	地下1階 α _Y 廃液貯槽室
主な発生源	コンクリートセルα-1、α _Y アイソレーションルーム、α _Y メンテナンスボックス
構造及び材質	SUS304鋼板製
容量、数量	0.2 m ³ × 2基
処理場引き渡し方法	槽内廃液をサンプリング後、固化処理を行い、固体廃棄物として処理する。
警報設備	貯槽水位高、集水ピット高

(3) 気体廃棄物処理設備

気体廃棄物処理設備は、セル・グローブボックス等の閉じ込め機能を確保するために設けられており、放射性物質の外部環境への放出を抑制するための設備である。本設備は排気系と排気筒から構成される。各排気系は、セル、グローブボックス、実験室等の負圧及びフード開口部の風速を維持し、その給排気をワンスルー方式として高性能ろ過フィルタでろ過した後、排気筒から放出する。排気筒では常時放射能濃度を監視する。

気体廃棄物処理設備は、次のような方針で設計を行う。

- (1) 気体廃棄物廃棄設備は、本施設から発生する気体廃棄物に対し、適切にろ過、管理等を行うことにより、周辺環境への放出放射性物質の濃度及び量を低減できる設計とする。
- (2) 管理区域は密閉構造とし、適宜換気を行う。管理区域内の温度及び湿度を常時管理するとともに、循環系に備えたフィルタによって空気のろ過を行う。
- (3) 気体廃棄物廃棄設備の必要な部分にはブロワの予備機を設けるとともに、停電時には圧縮空気によりダンパーを閉じる設計とする。
- (4) 気体廃棄物廃棄設備の必要な部分にはフィルタの予備を設けるとともに点検及び交換ができる設計とする。

常用負圧の維持値は、WASTEFを参考にすると、室内に対し98.1 Pa以上294 Pa以下である。また、警報装置の作動条件は、室内に対し49 Pa以下である。排気系統としてセル系排風機8系統、実験室系排風機4系統により構成されている。各系統の排気風量は体積と換気回数から決定される。Table 3.3.12に排気系統の仕様を示す。

Table 3.3.12 Specifications of exhaust system.

系統番号	セル、居室等	排気風量	排風機	フィルタ
1	コンクリートセルβ-1	TBD	2系統	(Pre 1段、HEPA 2段) ×2 系統
2	コンクリートセルβ-2～3	TBD	2系統	(Pre 1段、HEPA 2段) ×2 系統
3	コンクリートセルβ-4～5	TBD	2系統	(Pre 1段、HEPA 2段) ×2 系統
4	コンクリートセル β-6、高レベル廃液貯槽	TBD	2系統	(Pre 1段、HEPA 2段) ×2 系統
5	鉄セルF-1～4、ラボL-3～4 (フード、グローブボックス)	TBD	2系統	(Pre 1段、HEPA 2段) ×2 系統
6	βγアイソレーションルーム	TBD	2系統	(Pre 1段、HEPA 2段) ×2 系統
7	コンクリートセルα-1	TBD	2系統	(Pre 1段、HEPA 2段) ×2 系統
8	メンテナンスボックス、αγアイソレーションルーム、αγ廃液貯槽	TBD	2系統	(Pre 1段、HEPA 2段) ×2 系統
9	サービスエリア	TBD	1系統	(Pre 1段、HEPA 1段) ×1 系統
10	操作室、マニピュレータメンテナンス室、ラボL-1～2 (フード)	TBD	1系統	(Pre 1段、HEPA 1段) ×1 系統
11	ホットモックアップ室、低レベル廃液貯槽、フード	TBD	1系統	(Pre 1段、HEPA 1段) ×1 系統
12	ホット機械室、高レベル廃液貯槽室、サンプリング室	TBD	1系統	(Pre 1段、HEPA 1段) ×1 系統

3.3.6 ユーティリティ

(1) 受変電設備

中央変電所を経由して、6.6 kV の電圧で本施設の高圧受電盤に受電する。受電後は変圧器で必要な電圧に降圧して、各設備の機器、実験盤等に給電する。以下に主要系統と非常用電源設備の基本的な構成を示す。

【主要系統】

1) 商用系

- ① 低圧電灯盤No.1, No.2 (1φ6,600 V / 210 V-105 V)
- ② 200V 動力盤No.1, No.2 (3φ6,600 V / 210 V)
- ③ 415V 動力盤No.1, No.2 (3φ6,600 V / 420V)

2) 非常系

- ① 非常系415V 動力
- ② 非常系200V 動力 (3φ420 V / 210 V)
- ③ 非常系電灯盤(1φ420 V / 210V -105 V)

【非常用電源設備】

商用電源が停電した場合に備え、蓄電池や発電機などの非常用電源設備を設置し、保安上重要な設備に給電する。主要な負荷は、放射線管理設備、警報設備、保安灯、放送設備等である。

(2) 冷却水設備

多くの機器では冷却が必要な場合はチラーを用いるため、今のところ実験設備で冷却水設備が必要な機器はない。将来のニーズに備え冷却水設備を用意しておくこととする。

(3) 空調換気設備

空調換気設備には以下の機能が要求される。

1) 導入外気の浄化

外気中には塵埃、塩分粒子等が含まれる。これら粒子の放射化防止や機器の健全性を確保するため、施設への導入外気はフィルタ等により浄化する。

2) 換気量の維持

施設内各部屋の空気清浄度の維持ならびに建家から排出される排気中の放射性物質希釈のため、定められた換気量を確保する。

3) 負圧度の維持

放射性物質の外部への漏えいを防止するため、管理区域内の気圧を大気圧に対して常に負圧となるよう維持する。

4) 温度、湿度の維持

施設内の作業や設備機器に対し、適切な温度、湿度環境を維持する。

5) 排気の浄化

換気によって生じる排気は、施設から外部環境への放射性物質の放出を十分低減出来るように、適切なフィルタを介して行う。

これらの機能を持つように空調換気の機器構成、設計を行う。以下に管理区域ならびに非管理区域における空調換気設備系統の基本的な機器構成を示す。

管理区域

管理区域の負圧度は、吸気系に設置した微差圧計発信器からの信号により、負圧調整用ダンパーの開度を自動操作して供給風量の調整を行うことで維持される。また、排気量維持のため排気量発信器からの信号を基に、排気量調整用ダンパーの開度を自動制御し、排気量の調整を行う給気系統及び排気系統の機器構成を以下に示す。なお、**3.3.5 (3)** で記載した気体廃棄物廃棄設備は、管理区域空調換気系統を兼ねている。

a) 給気系

- ① 外気取入口
- ② 外気除塵用フィルタ（プレフィルタ）
- ③ 除塩フィルタ
- ④ 自動制御ダンパー
- ⑤ コイルユニット
- ⑥ 送風機
- ⑦ 差圧発信器

b) 排気系

- ① プレフィルタ
- ② HEPA フィルタ
- ③ 自動制御ダンパー
- ④ 排風機
- ⑤ 風量センサー
- ⑥ 逆止ダンパー

非管理区域

非管理区域においては負圧管理を行う必要が無いため、排気量の維持、清浄な空気の導入及び温度、湿度管理が主な機能となる。換気量は陽子照射施設と同様の 0.5 回 / h とする。給気系統及び排気系統の機器構成を以下に示す。

a) 給気系

- ① 外気取入口
- ② 外気除塵用フィルタ（プレフィルタ）
- ③ 除塩フィルタ
- ④ ダンパー
- ⑤ コイルユニット
- ⑥ 送風機

b) 排気系

- ① ダンパー

② 排風機

(4) 圧縮空気設備

圧縮空気設備は、換気空調設備のダンパー開閉用等の制御用圧縮空気を供給するための装置であり、空気圧縮機、空気槽、フィルタ、除湿機器で構成する。空気圧縮機は空冷方式とする。また、予備機を設け、故障時には自動的に予備機に切替わるようにする。空気圧縮機の主な仕様は次のとおりである。

スクリー圧縮機 (3 N m³/ min、電動機 22 kW ×2 台)

用途：気体廃棄設備ダンパー駆動源、計測機器、実験用、除湿器 (冷凍式エアードライヤー)

3.3.7 放射線安全管理設備

J-PARC の放射線安全管理設備は、各施設に設置された放射線監視設備と入退出管理設備、及び中央制御棟に設置された集中監視システムから構成されている。放射線監視設備の役割は、「外部への放射線漏えいが規程値以内であること」及び「作業場所の放射線量が規程値以内であること」を確認することであり、前者の役割は排気モニタリング設備が、後者の役割は作業環境モニタリング設備がそれぞれ担う。一方、入退出管理設備の役割は、放射線管理区域における人員安全を確保することである。集中監視システムについては、参考文献 2)に記載されているとおりなので、ここでは本 PIE 施設の排気モニタリング設備、作業環境モニタリング設備及び入退出管理設備について述べる。

(1) 排気モニタリング設備

PIE 施設からの排気中に含まれる放射性物質を監視するための設備である。トリチウムや希ガスなどガス状放射性物質を測定するための排気ガスモニタと、ダスト状放射性物質を測定するための排気ダストガスモニタを、それぞれホット機械室のフィルタユニットからスタックの間に設置する。排気ガスモニタの検出器は、β線及びγ線対応の2種類設置する。排気ダストガスモニタはα線、β線及びγ線対応の3種類設置する。

(2) 作業環境モニタリング設備

PIE 施設の作業環境モニタリング設備は、①放射線エリアモニタと②室内ガスモニタで構成する。放射線エリアモニタは、一般区域又は作業者が常時立入る管理区域で放射線レベルの上昇を監視し、閾値超過に対して警報を発する。操作室、サービスエリア、ホット機械室などの他、建屋外にも設置する。室内ガスモニタは、ホットセル内の線量監視 (インセルモニタ)、ラボ内の線量監視を行う。インセルモニタの計測値は、作業者のセル内への立ち入り可否の判断材料となるだけでなく、背面遮蔽扉開閉のインターロックでもある。ラボの室内ガスモニタは、フードのグローブボックスからの放射性物質漏えいを監視する。

(3) 入退出管理設備

PIE 施設の入退出管理設備は、非接触式 IC 素子を組み込みこんだ個人線量計により、入域ゲートと退域ゲートにおいて個人線量計の着用チェックと入退管理を兼用するシステムである。出入り管理室では、操作室側への入退域ゲートとサービスエリア側への入退域ゲートは分けられている。

3.4 建家配置案

ここまでの検討結果を基に建家配置案を作成した。建家の平面配置図を Fig. 3.4.1～3.4.5 に、立面図を Fig. 3.4.6～3.4.13 に、陽子照射施設との位置関係を示す図を Fig. 3.4.14～3.4.15 にそれぞれ示す。

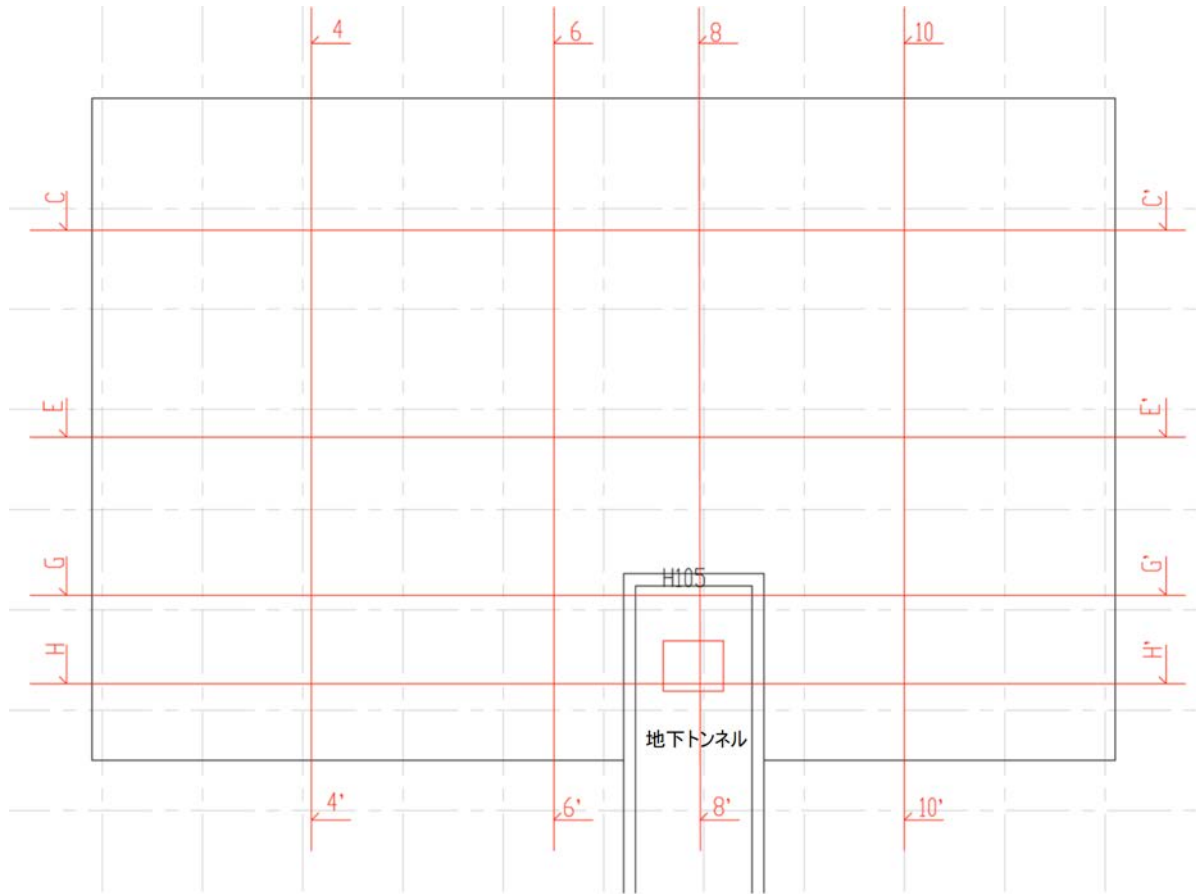


Fig. 3.4.1 PIE facility floor plan (B2F).

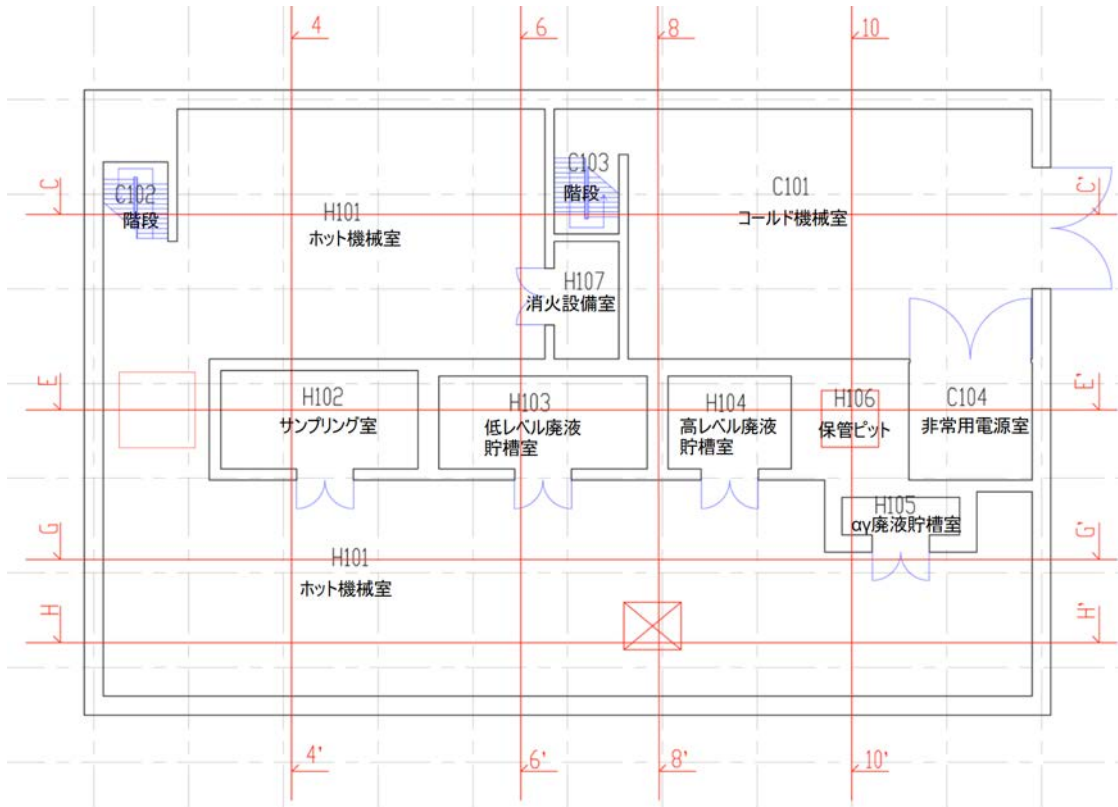


Fig. 3.4.2 PIE facility floor plan (B1F).

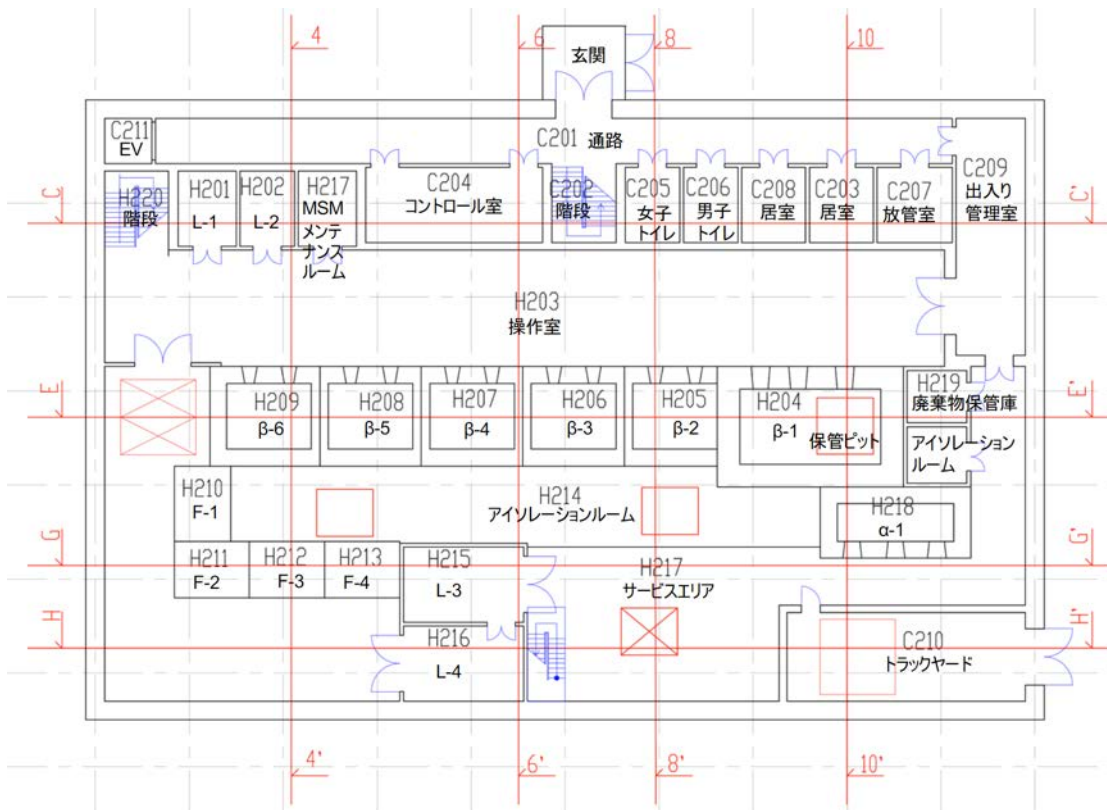


Fig. 3.4.3 PIE facility floor plan (ground floor).

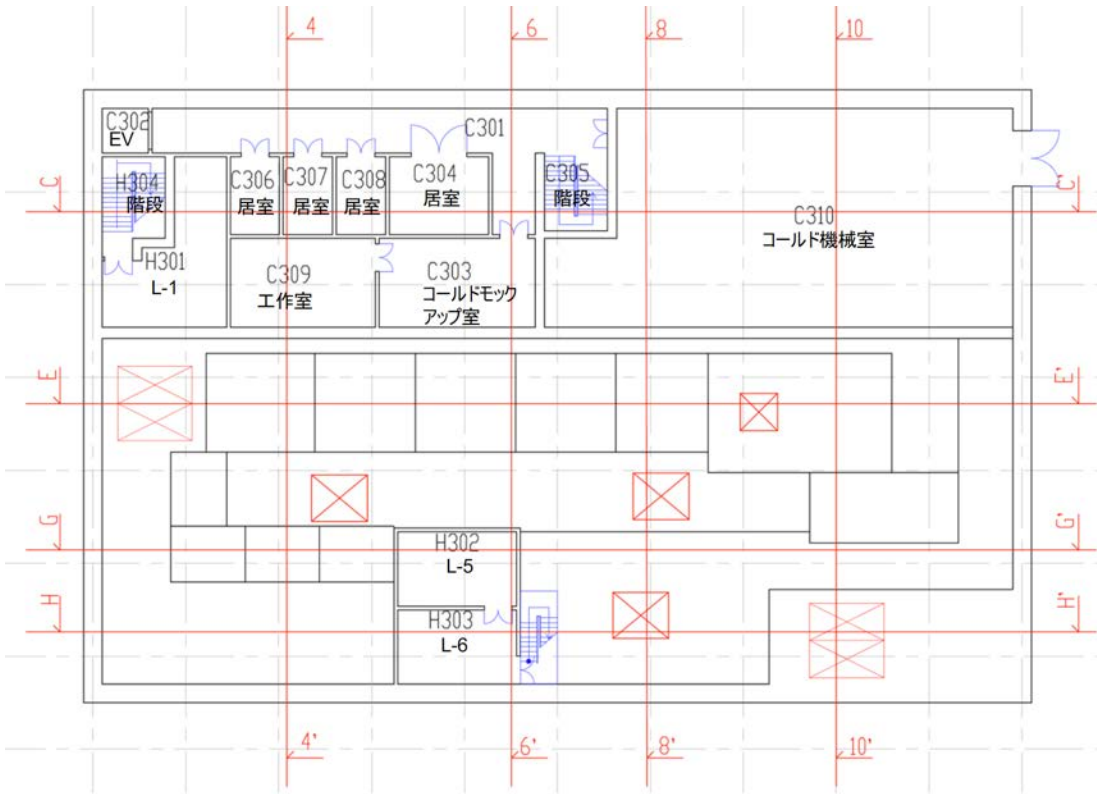


Fig. 3.4.4 PIE facility floor plan (2nd floor).

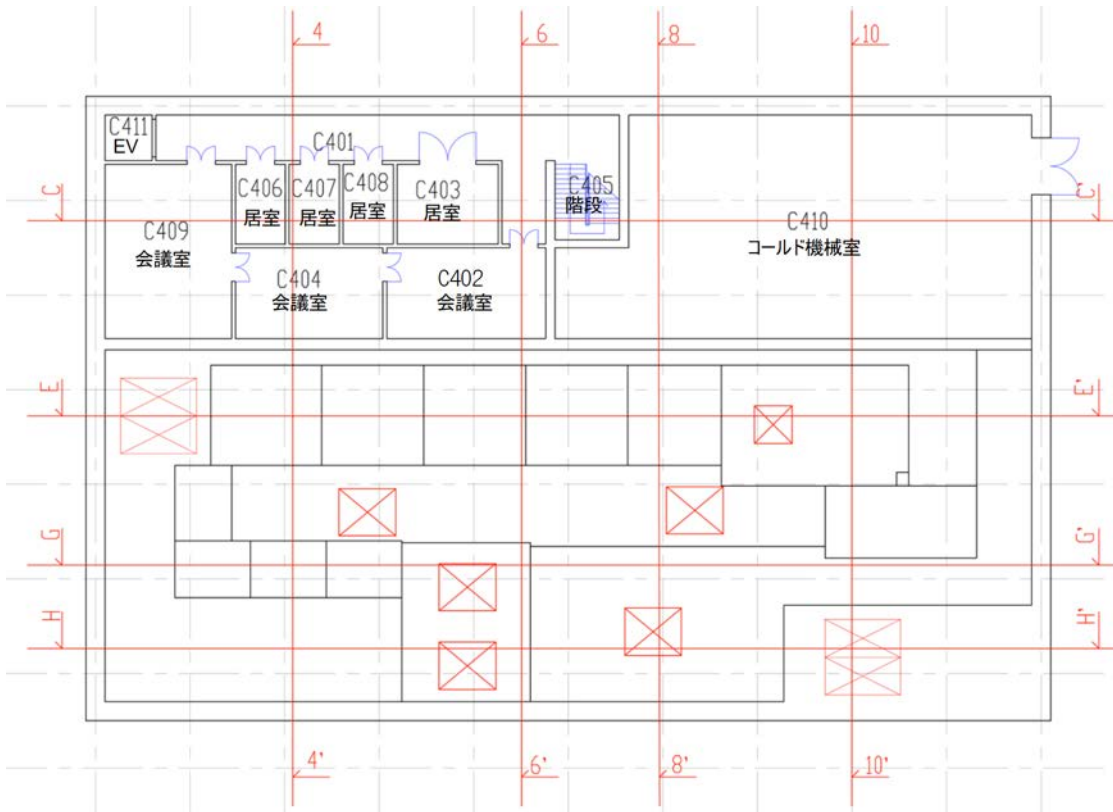


Fig. 3.4.5 PIE facility floor plan (3rd floor).

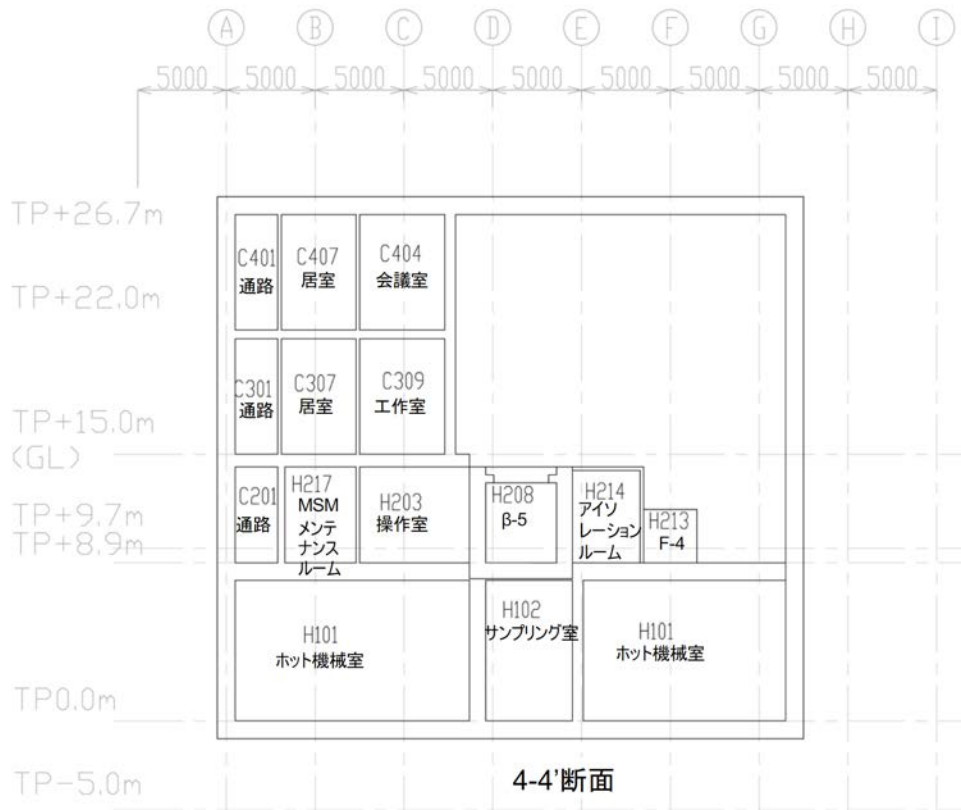


Fig. 3.4.6 Elevation view of PIE facility (4-4').

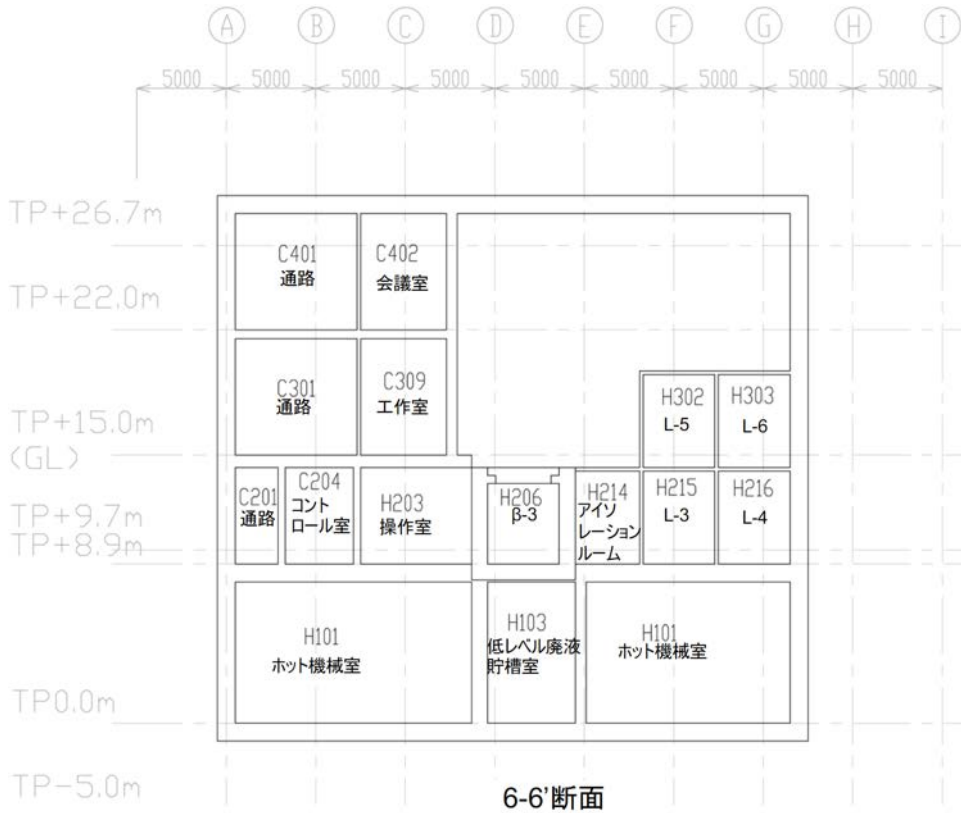


Fig. 3.4.7 Elevation view of PIE facility (6-6').

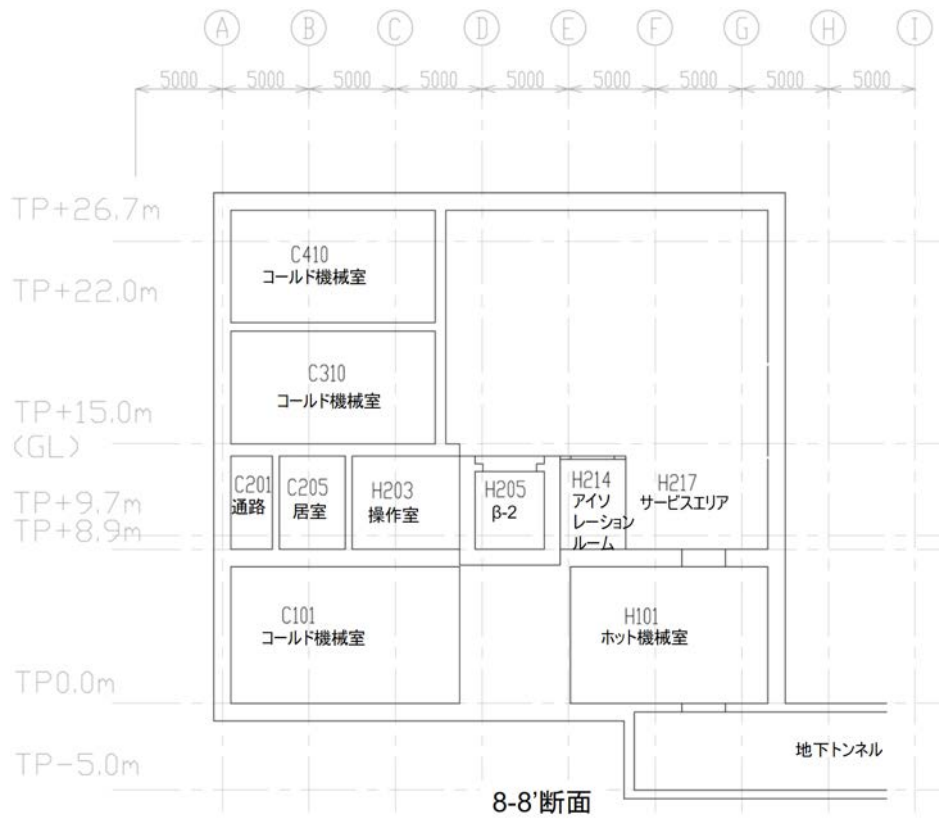


Fig. 3.4.8 Elevation view of PIE facility (8-8').

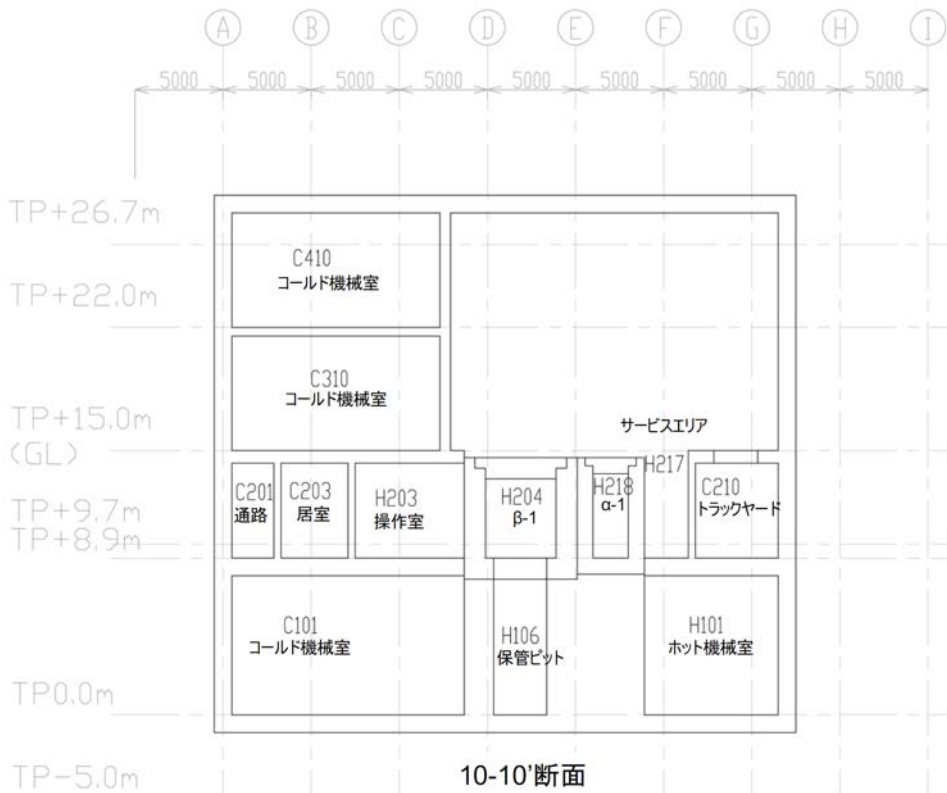


Fig. 3.4.9 Elevation view of PIE facility (10-10').

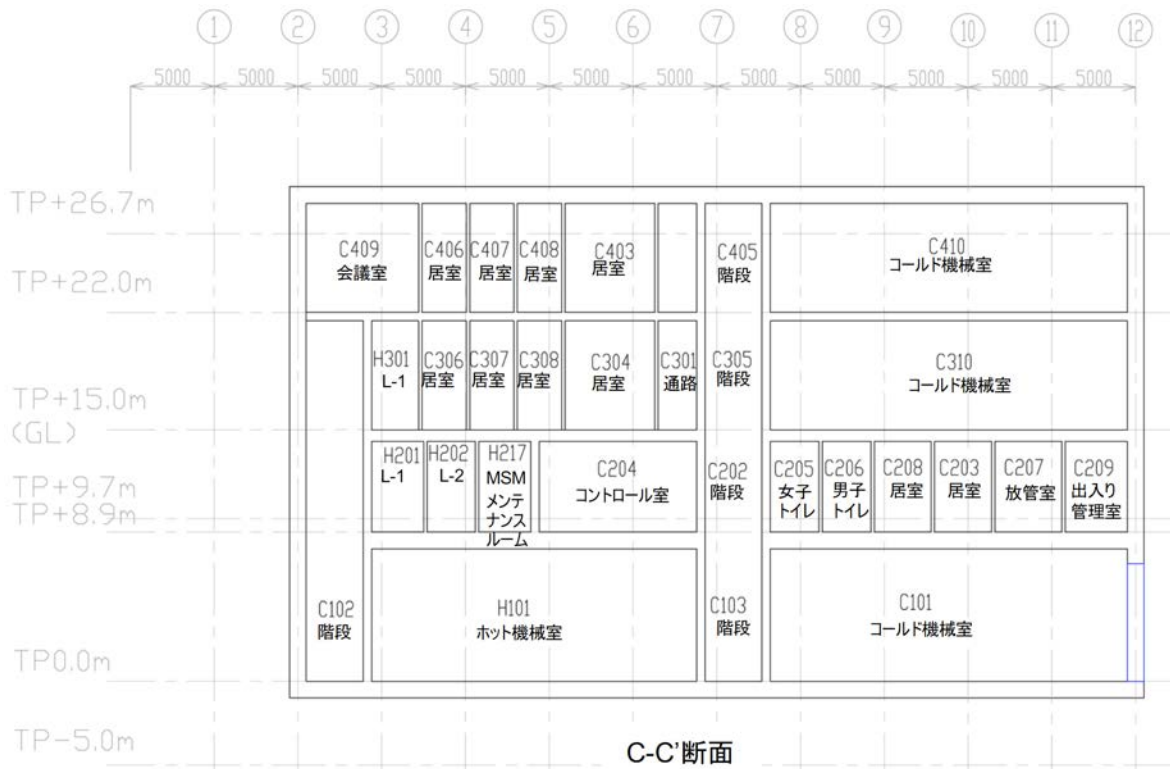


Fig. 3.4.10 Elevation view of PIE facility (C-C').

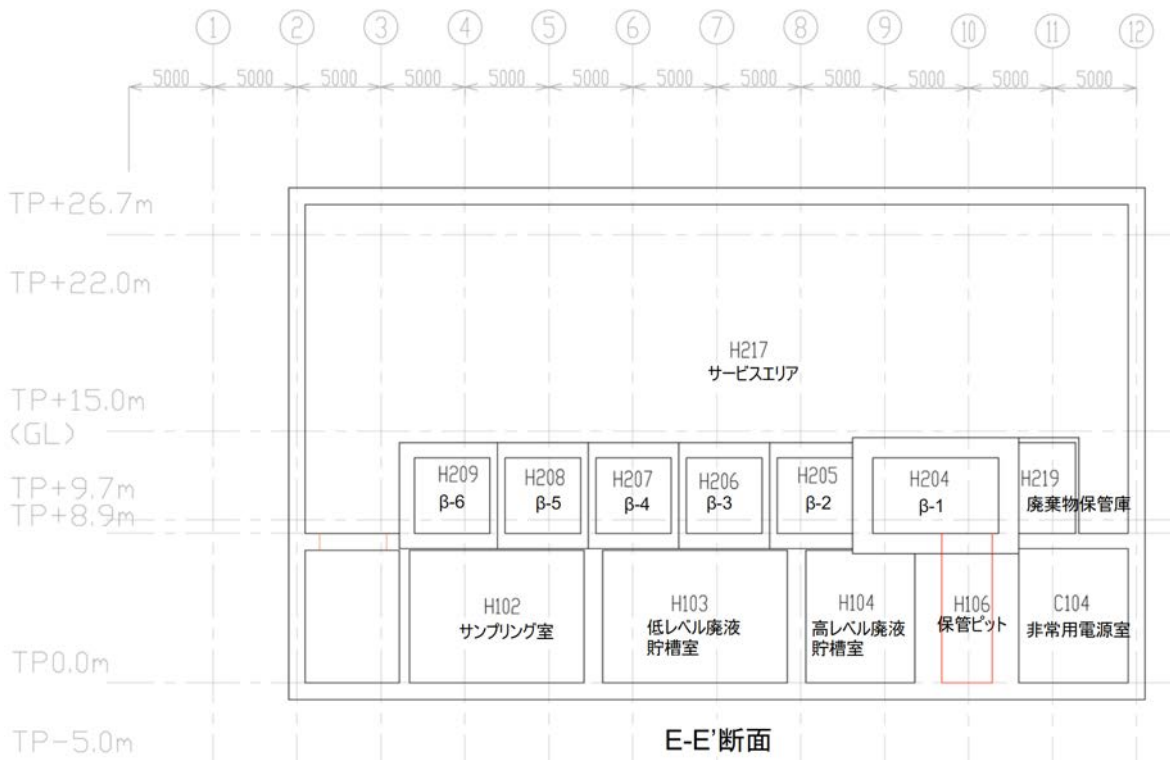


Fig. 3.4.11 Elevation view of PIE facility (E-E').

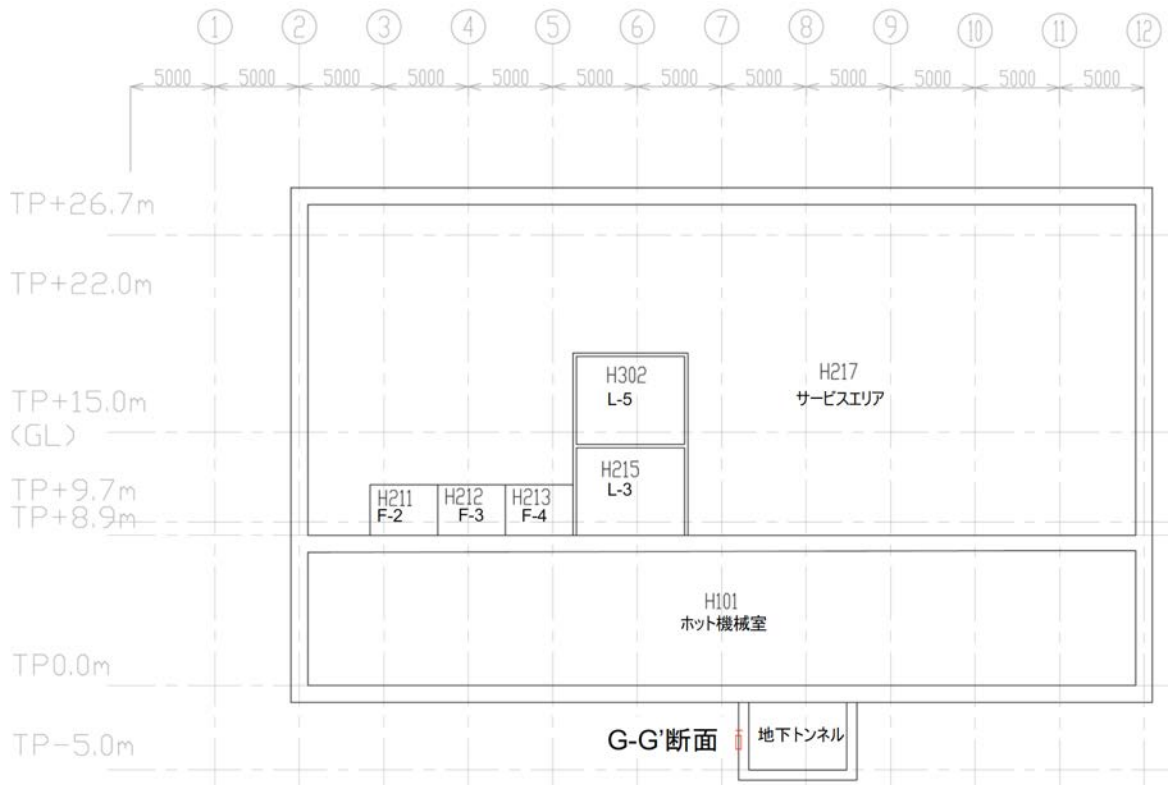


Fig. 3.4.12 Elevation view of PIE facility (G-G').

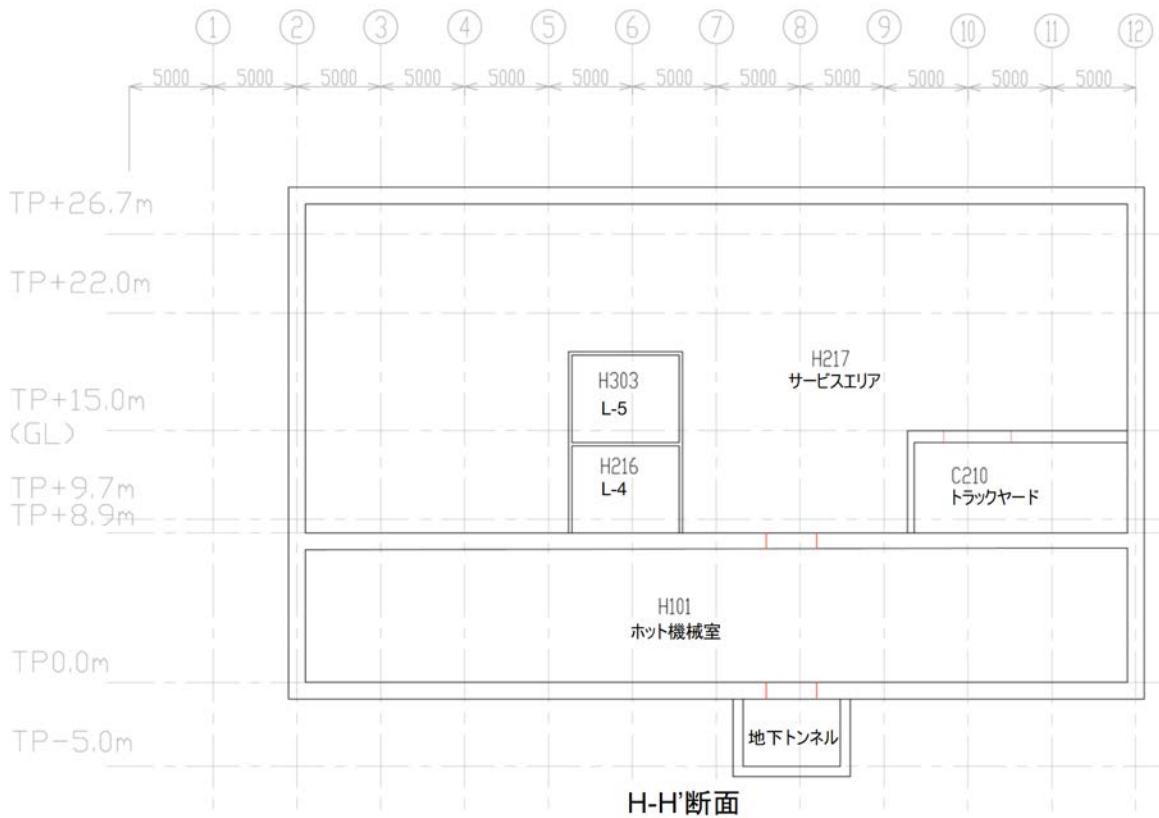


Fig. 3.4.13 Elevation view of PIE facility (H-H').

3.5 機器設計の概要

3.5.1 試験片製作機器

Table 3.5.1に試験片製作関連機器のリストを示す。

Table 3.5.1 List of specimen manufacturing equipment.

試験工程	試験機	試験機数	設置場所	備考
切断	切断機	1	コンクリートセルB-6	
試験片加工	フライス加工機	1	コンクリートセルB-6	
ノッチ加工	ノッチ入れ加工機	1	コンクリートセルB-6	
研磨	研磨機	1	コンクリートセルB-6	
外観観察	光学顕微鏡	1	コンクリートセルB-6	
寸法測定	寸法測定機器	1	コンクリートセルB-6	
LBE洗浄	オイルバス	1	コンクリートセルB-6	

各機器の詳細を以下に示す。

(1) 切断機・ノッチ入れ加工機

試験片の製作と 3.3 mm × 3.3 mm のミニチュアシャルピー試験片へのノッチ加工を行う。回転刃式とワイヤ放電加工機とする。回転刃式は、回転刃と X-Y ステージ等を用いて試験片に回転刃の断面形状のノッチを入れる手法である。回転刃の交換により、ノッチ形状や角度を変えることができる。ワイヤ放電加工機は、コンピュータ制御により良好な加工精度が得られる。ワイヤー切れやワイヤー交換への対応は遠隔で対応できることが必要である。いずれの方式も制御部分を本体から切り離し、セル外に設置できることが望ましい。それぞれ機器の主な仕様は次のとおりである。

回転刃式切断機

- 電源 : 200 V
- 主軸モーター出力 : 1.5 kW
- 回転刃サイズ : φ200 mm
- 回転速度 : 調整可能
- 切断可能範囲 : W 150 mm × L 250 mm
- 冷却水 : 循環式
- 外寸 : W 1,000 mm × L 800 mm × H 900 mm
- 重量 : 200 kg

ワイヤ放電加工機

- 電源 : 200 V
- 加工範囲 : W 400 mm × L 300 mm × H 200 mm

-外寸	: W 2,000 mm × L 2,500 mm × H 2,000 mm
-重量	: 2,700 kg

(2) フライス加工機

角断面である疲労試験機のゲージ部を丸断面に加工するフライス加工機である。試験片を回転させながらフライス加工することでゲージ部を丸断面に加工できる。フライス加工機の主な仕様は次のとおりである。

-電源	: 200 V
-主軸モーター出力	: 1.5 kW
-加工可能範囲	: W 100 mm × L 100 mm
-冷却水	: 循環式
-外寸	: W 1,000 mm × L 800 mm × H 900 mm
-重量	: 100 kg

(3) 研磨機

加工後の試験片の仕上げや金粗観察用試料を作製するための研磨機である。研磨機の主な仕様は次のとおりである。

-電源	: 100 V
-研磨盤	: ϕ 150 mm
-研磨盤回転速度	: 調整可能
-試料最大径	: 最大 ϕ 40 mmの試料を研磨可能

(4) 光学顕微鏡

製作あるいは加工後の試験片の外観を観察、確認するためのデジタル光学顕微鏡である。デジタル光学顕微鏡の主な仕様は次のとおりである。

-電源	: 100 V
-倍率	: 0~50 倍、20~200 倍
-試料ステージ移動軸	: X, Y, Z, θ

(5) 寸法測定機器

試験片の断面寸法を測定することにより、荷重または圧力の測定値を応力に変換出来る。さらに、照射スエリングやクリープ伸びを測定するためには、精密な計測測定ツールが必要である。目的に応じてノギス、ダイヤルゲージ、レーザーゲージなどと X-Y ステージなどを組み合わせて使用する。

(6) シリコンオイルバス

試験片に付着した LBE を洗浄するため、試験片をシリコンオイルバスへ浸漬し、残った鉛ビスマスを除去する。その後エタノール中で超音波洗浄を行う。シリコンオイルバスは 200°C

以上まで加熱可能で、攪拌機能（噴流攪拌式、回転子式、縦型攪拌方式）を有する。シリコンオイルバスの主な仕様は次のとおりである。

- 電源 : 100 V
- ヒーター出力 : 1 kW
- 最高温度 : >200°C
- 槽内寸法 : W 300 mm × D 200 mm × H 150 mm
- 外寸 : W 400 mm × D 250 mm × H 200 mm
- 重量 : 20 kg

3.5.2 機械強度試験機

Table 3.5.2 に機械強度試験機のリストを示す。

Table 3.5.2 List of mechanical strength testing machines.

試験	試験機	試験機数	設置場所	備考
引張圧縮試験	引張圧縮試験機 真空電気炉	1	コンクリートセルβ-2	SSRT、黒鉛圧縮試験
引張圧縮試験	引張圧縮試験機 LBE槽	1	コンクリートセルβ-2	SSRT
疲労試験	疲労試験機 真空電気炉	1	コンクリートセルβ-3	
疲労試験	疲労試験機 LBE槽	1	コンクリートセルβ-3	
クリープ試験	クリープ試験機 真空電気炉	1	コンクリートセルβ-4	
クリープ試験	クリープ試験機 LBE槽	1	コンクリートセルβ-4	
シャルピー衝撃試験	シャルピー衝撃試験機	1	コンクリートセル β-5	
SP 試験	引張圧縮試験機 恒温槽	1	コンクリートセル β-5	
硬さ試験	ビッカース硬さ試験機	1	鉄セルF-1	
ナノインデンテーション試験	ナノインデンテーション試験機	1	鉄セルF-1	

上記の試験機のうち、引張圧縮試験機、疲労試験機及びクリープ試験機については、遠隔での作業性、歪みゲージや伸び計の取付け方法やLBE槽の構造などを考慮し、横型とすることとした。各機器の詳細を以下に示す。

(1) 引張圧縮試験機

引張試験は、機械的特性の評価手法として最も多く行われる。歪みゲージを取り付けて歪み

測定を行い、材料の変形挙動を把握する。引張圧縮試験機の主な仕様は次のとおりである。

-型式	: 横型万能試験機
-荷重容量	: 5 kN～10 kN
-クロスヘッド速度率	: 0.0005～1,000 mm / min、標準引張 10^{-4} ～ 10^{-2} / s及び低速 10^{-7} / s
-真空電気炉の温度	: 最高600°C
-真空電気炉の雰囲気	: 真空、不活性ガス、大気（室温のみ）
-LBE槽の温度	: 最高600°C
-LBE槽の仕様	: 二重断熱構造、酸素濃度制御系
-LBE槽の計装	: 温度計、酸素濃度センサー、液位計

(2) 疲労試験機

疲労試験は、歪み制御モードの軸疲労試験を行う。歪みゲージを取り付けた試験片の軸方向に引張り、圧縮荷重を繰り返しかける。疲労試験機の主な仕様は次のとおりである。

-型式	: 横型疲労試験機
-繰り返し荷重容量	: 2.5 kN
-クロスヘッド速度率	: 0.002～200 mm / min
-真空電気炉の温度	: 最高600°C
-真空電気炉の雰囲気	: 真空、不活性ガス、大気（室温のみ）
-LBE槽の温度	: 最高600°C
-LBE槽の仕様	: 二重断熱構造、酸素濃度制御系
-LBE槽の計装	: 温度計、酸素濃度センサー、液位計

(3) クリープ試験機

クリープ試験は、伸び計を取り付けた試験片の軸方向に高温で一定の荷重を長時間負荷し、変形挙動を測定する試験である。クリープ試験機の主な仕様は次のとおりである。

-型式	: 横型クリープ試験機
-荷重容量	: 5 kN
-真空電気炉の温度	: 最高600°C
-真空電気炉の雰囲気	: 真空、不活性ガス
-LBE槽の温度	: 最高600°C
-LBE槽の仕様	: 二重断熱構造、酸素濃度制御系
-LBE槽の計装	: 温度計、酸素濃度センサー、液位計

(4) シャルピー試験機

シャルピー衝撃試験は、材料の耐破壊性を評価し、脆性から延性への遷移曲線を得ることができる。この試験機は、サブサイズと呼ばれる小さな試験片（3.3 mm × 3.3 mm × 27 mm）に特化している。シャルピー衝撃試験機の主な仕様は次のとおりである。

-試験片タイプ	: サブサイズシャルピー試験片
---------	-----------------

-エネルギー	: 50 J
-最大衝撃速度	: 3.7 m / s、
-温度範囲	: -196°C~300°C
-測定項目	: 衝撃中の荷重、変位、角度
-その他	: 自動試験片供給及び位置決め空気圧システム

(5) SP Test

SP (Small Punch) 試験は、板状試験片を先端半球の圧子又は鋼球で押し込み、荷重変位曲線から機械的特性のデータを取得する試験法である。照射試験でよく使われるのは、試験片サイズがφ3 mm (TEM disc) 又は4 mm角、鋼球サイズφ1.0 mmの組合せである。SP試験機的主要仕様は次のとおりである。

-型式	: 縦型万能試験機
-荷重容量	: 1 kN~2 kN
-クロスヘッド速度率	: 0.0005~1,000 mm / min、標準引張 10^{-4} ~ 10^{-2} / s
-恒温槽の温度範囲	: -196~300°C
-恒温槽の雰囲気	: 不活性ガス、大気

(6) 硬さ試験機

硬さ試験は、照射による硬さの変化や、溶接部など不均一な材料の硬さ分布を調べるために用いる。試験機は、マイクロビッカース硬さ試験機とする。試験機的主要仕様は次のとおりである。

-試験力	: 10 mN~20 N
-圧子	: ビッカース
-その他	: 自動測定

(7) ナノインデンテーション試験

ナノインデンテーション試験は、圧子を試料に押し込み、試料に印加する荷重と圧子の変位から荷重変位曲線を得、この荷重変位曲線を解析することにより、各種機械特性を評価する手法である。試験機的主要仕様は次のとおりである。

-試験力	: 0.1 mN~2,000 mN
-押し込み深さ測定	: 0~10 μm
-圧子	: ベルコビッチ
-その他	: 自動測定

3.5.3 表面観察機器

Table 3.5.3に表面観察機器のリストを示す。

Table 3.5.3 List of surface observation instruments.

試験	試験機	試験機数	設置場所	備考
切断	切断機	1	コンクリートセルβ-6	3.5.1と共通
樹脂埋め	樹脂埋め機	1	コンクリートセルβ-6	
研磨	研磨機	1	コンクリートセルβ-6	3.5.1と共通
表面観察	レーザー顕微鏡	1	鉄セルF-2	
組織観察	金属顕微鏡	1	鉄セルF-2	
破面観察	走査電子顕微鏡 (SEM)	1	鉄セルF-2	
表面観察/分析	電界放出型走査電子顕微鏡 (FE-SEM)	1	鉄セルF-3	

各機器の詳細を以下に示す。

(1) 切断機

金相観察やSEM観察の試料を作製するための切断機であり、**3.5.1**と共通である。

(2) 樹脂埋め機器

切断した試料を研磨するための樹脂埋め機器である。樹脂は、2液混合型のエポキシまたはアクリル樹脂を用いる。熱可塑性樹脂を用いるとLBEが付着した試料を樹脂埋めする場合、融点以上の温度になりLBEが溶融するため不向きである。隙間や空隙の発生を防止するため、2液混合型樹脂の性状に応じて真空又は加圧型の脱泡機を用いる。

(3) 研磨機

金相観察用試料を作製するための研磨機であり、**3.5.1**と共通である。

(4) レーザー顕微鏡

レーザー顕微鏡は、腐食部の表面観察等に用いる。腐食部の酸化物や減肉部などを立体的に観察する。総合倍率範囲は×50～×15,000前後、表面粗さ測定、幅測定、高さ測定、電動ステージによる自動測定などの機能を有することとする。

(5) 金属顕微鏡

金属顕微鏡は、照射試料の組織観察や腐食部の断面観察等に用いる。倍率範囲は×1～×1,000、明視野、暗視野、偏光などの観察モード、干渉コントラストなどを有することとする。XYテーブルは電動とする。

(6) 走査電子顕微鏡 (SEM)

SEMは、機械強度試験後の破面観察や元素分布を測定するために使用される。倍率範囲は×40～×5,000倍程度、広範囲の元素に対応したエネルギー分散型X線分析装置 (EDS) を装備することとする。必要に応じて試料室周りに遮蔽を追加出来ることや制御部を本体から切り離せることが望ましい。SEMの主な仕様は次のとおりである。

-加速電圧	: 0.3～30 kV
-二次電子観察像分解能	: 3 nm@30 kV
-試料サイズ	: 最大φ300 mm
-試料ステージ	: 5軸電動ステージ

(7) 電界放出型走査電子顕微鏡 (FE-SEM)

FE-SEMは、SEMよりも高倍率、高分解能で断面観察や元素分析を行う際に用いる。倍率範囲は～×10,000倍程度、広範囲の元素に対応したEDSを装備することとする。SEMと同様に必要に応じて試料室周りに遮蔽を追加出来ることや制御部を本体から切り離せることが望ましい。FE-SEMの主な仕様は次のとおりである。

-加速電圧	: 0.5～30 kV
-二次電子観察像分解能	: 0.6 nm@15 kV
-試料サイズ	: 最大φ150 mm
-試料ステージ	: 5軸電動ステージ

3.5.4 微細組織観察機器

Table 3.5.4 に微細組織観察機器のリストを示す。

Table 3.5.4 List of microstructure observation instruments.

試験	試験機	試験機数	設置場所	備考
電解研磨	電解研磨装置	1	ラボ L-1	フード内に設置
集束イオン研磨	集束イオン研磨装置 (FIB)	1	ラボ L-1	
微細組織観察	透過型電子顕微鏡 (TEM)	1	ラボ L-1	

各機器の詳細を以下に示す。

(1) 電解研磨装置

電解研磨装置は、TEM 観察用の薄膜試料を作成するために用いる。電解研磨装置は、定電圧電源ユニットと電解液槽及び試料ホルダーから構成される。電解液槽及び試料ホルダーはフード内に設置し、必要に応じて鉛ブロック等による遮蔽を設ける。

(2) 集束イオン研磨装置 (FIB)

FIB は TEM 観察用の試料を作成するために用いる。FIB の主な仕様は次のとおりである。

-加速電圧	: 0.5~30 kV
-二次電子観察像分解能	: 4 nm@30 kV
-試料サイズ	: 50 mm × 50 mm × 10mmt
-試料ステージ	: 5軸電動ユーセントリックステージ
-その他	: TEM試料連続自動加工

(3) 透過型電子顕微鏡 (TEM)

TEM は照射試料の微細組織観察に用いる。TEM の主な仕様は次のとおりである。

-電子銃	: W又はLaB ₆
-加速電圧	: 20~120 kV
-分解能 (格子)	: 0.14 nm@120 kV
-最大倍率	: ×1,000,000
-試料ステージ最大傾斜角度	: ±30°
-その他	: オートフォーカス、ドリフト補正

3.5.5 黒鉛材料試験機器

Table 3.5.5 に黒鉛材料試験機器のリストを示す。

Table 3.5.5 List of graphite testing equipment.

試験	試験機	試験機数	設置場所	備考
圧縮試験	引張圧縮試験機 真空電気炉	1	コンクリートセル B-2	金属材料用と共通
熱拡散率測定	熱拡散率測定器 (レーザーフラッシュ法)	1	ラボL-4	グローブボックス内に設置
密度測定	密度測定器 (水銀ポロシメーター)	1	ラボL-4	グローブボックス内に設置

各機器の詳細を以下に示す。

(1) 引張圧縮試験機

引張圧縮試験機は、**3.5.2** と共通である。

(2) 熱拡散率測定器

熱拡散率の測定は、レーザーフラッシュ法を用いる。レーザーフラッシュ法は、試料の片面にレーザーを閃光照射（フラッシュ）し、これにより発生した熱が反対面に拡散する挙動を基に熱拡散率を算出する。熱拡散率測定器の主な仕様は次のとおりである。

- 温度測定範囲 : 室温～1,500°C
- 昇温速度 : 10°C /min
- 試料寸法 : φ10 mm×1～3 mmt
- 測定雰囲気 : 真空中

(3) 密度測定器

密度の測定は水銀圧入法（水銀圧入式ポロシメーター）を用いる。水銀圧入法は、表面張力の高い水銀に圧力を加え、固体表面の細孔や隙間の中に水銀を圧入し、その時に加えた圧力と押し込まれた水銀容積との関係から細孔分布が得られる。このデータを解析することで密度も求めることが出来る。密度測定器の主な仕様は次のとおりである。

- 細孔直径 : 3 nm～500 μm
- 圧力範囲 : 大気圧～414 MPa
- 試料セル寸法 : φ15 mm×20 mm

3.5.6 LBE 分析機器

Table 3.5.6 に LBE 分析機器のリストを示す。

Table 3.5.6 List of LBE analysis instruments.

試験	試験機	試験機数	設置場所	備考
ガンマ線分析	ガンマ線スペクトル測定器	1	陽子照射施設 小型セル	参考文献 2)
LBE 試料調整	ガラス機器等	-	鉄セル F-4	
蒸散法	電気炉、ガラス機器、液体シンチレータ、ガンマ線スペクトル測定器、ICP	1	ラボL-3	グローブボックス内に設置
熱クロマトグラフィ	電気炉、ガラス機器、ガンマ線スペクトル測定器	1	ラボL-3	グローブボックス内に設置

各機器の詳細を以下に示す。

(1) LBE 試料調整

LBE の試料調整は、不純物の混入を避けるため、石英ガラス器具を用いる。試料調整は、溶解、抽出などの工程によって分析対象の元素以外の元素を除去するために行う。

(2) 蒸散法測定装置

蒸散法 (Transpiration method) は、キャリアガス中で LBE を加熱し、蒸発した元素を冷間部の石英管に析出させる。石英管の内面を酸等で洗い、洗浄液を ICP 等で元素分析または液体シンチレータで測定を行う。検出できるのは、LBE 中に固溶している元素で、測定温度内で蒸発するものに限られる。液体シンチレータを用いることで Po、Hg の同位体など β 線や α 線放出核も測定出来る。蒸散法によって得られる、ヘンリー定数 KH は理想的な希薄溶液での平衡蒸気圧で、蒸発を特徴付けるための基本的なパラメータである。

(3) 熱クロマトグラフィ測定装置

熱クロマトグラフィ (TC; Thermo-chromatography) は、LBE を加熱し、蒸発した元素を温度勾配のある石英カラム中で析出させ、これをコリメータとゲルマニウム検出器を用いて分布を測定する。検出可能なのは、LBE 中に固溶しているか、析出している元素で、測定温度内で蒸発し、かつ γ 線を放出するものに限られる。熱クロマトグラフィで得られたグラフ (Thermo-chromatogram) から、さまざまな条件下で形成された元素を識別して、吸着エンタルピーを決定出来る。これは、排気系のフィルタシステムを開発するために重要である。

3.5.7 その他の試験機器

Table 3.5.7 にその他の試験機器のリストを示す。

Table 3.5.7 List of other testing equipment.

試験	試験機	試験機数	設置場所	備考
ガス分析	電気炉・四重極質量分析器	1	ラボ L-4	グローブボックス内に設置

各機器の詳細を以下に示す。

(1) ガス分析器

照射環境下において水素、ヘリウムは材料の微細組織発達に大きく影響することが知られており、ガス分析で得られる知見によって機械的特性試験、微細組織観察の結果を補完することが出来る。分析対象となるガスの種類は水素、ヘリウムの同位体 (H、D、T、 ^3He 、 ^4He) 及び水素分子 (H_2 、HD、 D_2 、HT、DT、 T_2) である。必要な分解能は、 D_2 ($m/e = 4.0282$) と ^4He ($m/e = 4.0026$) が分離可能なことであるが、市販の高分解能製品で対応可能である。加熱炉の最高温度は $1,500^\circ\text{C}$ とし、セラミック管にタングステンヒーター加熱式とする。分析に必要な試料の重量は mg オーダーであるが、放射性のガスが放出されるため、分析

装置はグローブボックス内に設置する。真空ポンプはオイルフリーとする。ターボ分子ポンプ (TMP; Turbo Molecular Pump) は磁気軸受またはセラミック軸受とする。粗引きポンプはスクロールかダイヤフラムポンプとする。排気速度はチャンバーの大きさに合わせて選定する。シール材は耐放射線性があるものを選定する。

3.5.8 RI の分離、精製

Ac-225の分離、精製の詳細については参考文献3)を参考とし、以下に概略工程を示す。Thターゲットの重量は8 gである。

(1) Thターゲットの溶解

Th 8 gを10M硝酸60 ml+1Mフッ酸12.5 mlに溶解。

(2) 蒸発固化と再溶解

溶解液を蒸発固化後、1M硝酸80 mlに再溶解。

(3) 過酸化水素水添加

30%過酸化水素水56 mlを加え、約2時間攪拌。

(4) Thの除去

析出したThを水180 mlを用いて濾過。濾液を0.5 M硝酸で希釈。

(5) RaとAcの抽出、Th残渣の除去

DOWEX 50X8 (200-400 mesh, 10 ml) を用い、1Mクエン酸450 mlでTh残渣を洗浄、続いて0.5M硝酸50 mlで洗浄。8M硝酸80 mlでRaとAcを抽出。抽出液を水80 mlで希釈。

(6) RaとAcの分離

DGA-normal 0.2 mlと4M硝酸5 mlを用い、12M硝酸13 mlでAc-225とAc-227を溶出、続いて0.05M硝酸10 mlでLnを溶出。DGA-normal側にRaとAc残渣を抽出。

(7) Raの抽出、Ac残渣の除去

DGA-normal 1 mlでRaを抽出。Ra-225/Ac-225ジェネレーターとする。

(8) Ra-225から崩壊したAc-225の抽出

DGA-normal 0.2 mlと4M硝酸5 mlを用い、12M硝酸13 mlでAc-225を溶出する。DGA-normal中のRaはジェネレーターに戻す。

4. 建設計画

本 PIE 施設は、Fig. 4.1 に示すように陽子照射施設完成後に建設開始となり、約 5 年で落成の予定である。



Fig. 4.1 Construction plan for proton irradiation facility and PIE facility.

5. まとめ

J-PARC 陽子照射施設に隣接して建設を検討している PIE 施設について、PIE のフロー、試験項目などから必要なスペース等の概略を求め、配置案を検討した結果、現在の敷地で実現可能と考えられる。

今後はさらに以下の項目を中心に検討を進める。

- 放射線解析により遮蔽厚さの最適化
- 各工程の詳細検討による配置の見直し
- 各試験装置の詳細検討による必要スペースの見直し
- 配管、ケーブル等スペースの検討
- 地下トンネルと陽子照射施設との接続位置

これらの検討を進め、さらに精度の高い概念設計を行い、これを基にコスト評価や安全評価を行う。また、施設の検討と平行して照射後試験技術の開発を進める。

謝 辞

本稿の執筆に当たっては、J-PARC センターの PIE 関係者ならびに核変換ディビジョンの多くの方々に貴重な御助言と御協力を頂きました。また、臨界ホット試験技術部の多くの方々に施設見学の機会と貴重な御助言を頂きました。ここに深く感謝いたします。

参考文献

- 1) K. Tsujimoto, H. Oigawa, K. Kikuchi, Y. Kurata, M. Mizumoto, T. Sasa, S. Saito, K. Nishihara, M. Umeno, and H. Takei, “Feasibility of Lead-Bismuth-Cooled Accelerator-Driven System for Minor-Actinide Transmutation”, Nucl. Technol., Vol. 161, No. 3, (2008), pp.315–328.
- 2) J-PARC センター 核変換ディビジョン, “J-PARC 核変換実験施設 技術設計書—ADS ターゲット試験施設 (TEF-T) —”, JAEA-Technology 2017-003, (2017), 539p. DOI:10.11484/jaea-technology-2017-003
- 3) A. K. H. Robertson, B. L. McNeil, H. Yang, D. Gendron, R. Perron, V. Radchenko, S. Zeisler, P. Causey, and P. Schaffer, “ ^{232}Th -Spallation-Produced ^{225}Ac with Reduced ^{227}Ac Content”, Inorg. Chem., Vol. 59, No. 17, (2020), pp.12156–12165. DOI:10.1021/acs.inorgchem.0c01081

