

J-PARC ハドロン実験施設における標的監視用ヘリウムガス循環装置の構築

CONSTRUCTION OF THE HELIUM-GAS CIRCULATION SYSTEM FOR MONITORING TARGET SOUNDNESS AT J-PARC HADRON FACILITY

渡邊丈晃^{†A)}, 上利恵三^{A)}, 青木和也^{A)}, 家入正治^{A)}, 岩崎り^{A)}, 加藤洋二^{A)}, 里嘉典^{A)}, 澤田真也^{A)}, 高橋俊行^{A)}, 高橋仁^{A)}, 田中万博^{A)}, 豊田晃久^{A)}, 野海博之^{C)}, 萩原雅之^{B)}, 広瀬恵理奈^{A)}, 皆川道文^{A)}, 武藤亮太郎^{A)}, 森野雄平^{A)}, 山野井豊^{A)}

Hiroaki Watanabe^{†A)}, Keizo Agari^{A)}, Kazuya Aoki^{A)}, Masaharu Ieiri^{A)}, Ruri Iwasaki^{A)}, Yohji Katoh^{A)}, Yoshinori Sato^{A)}, Shin'ya Sawada^{A)}, Toshiyuki Takahashi^{A)}, Hitoshi Takahashi^{A)}, Kazuhiro Tanaka^{A)}, Akihisa Toyoda^{A)}, Hiroyuki Noumi^{C)}, Masayuki Hagiwara^{B)}, Erina Hirose^{A)}, Michifumi Minakawa^{A)}, Ryotaro Muto^{A)}, Yuhei Morino^{A)}, Yutaka Yamanoi^{A)}

^{A)} Institute of Particle and Nuclear Studies, High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

^{B)} Radiation Science Center, High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

^{C)} Research Center for Nuclear Physics, Osaka University

Abstract

We have newly constructed a helium-gas circulation system for monitoring production-target soundness in the Hadron Experimental Facility at J-PARC. The production target has been irradiated by 30-GeV proton beam with a beam power up to 50 kW. By the irradiation, radioactive materials are accumulated in the target. If the target failure happens, the radioactive materials in the target are emitted to an airtight target chamber, in which helium gas is filled. Therefore, by measuring the radiation level of the helium gas, soundness of the target can be monitored with high sensitivity. In this proceedings, design, construction and operation status of the helium-gas circulation system with radiation detectors are reported.

1. ハドロン 2 次粒子生成標的とヘリウムガス循環装置

ハドロン実験施設では、30 GeV の 1 次陽子ビームを 2 次粒子生成標的 (以下、標的) へ照射し、そこで発生する 2 次粒子 (K 中間子, π 中間子など) を実験エリアへ輸送しており、各実験エリアでは K 中間子などを使ったバリエティーに富んだ独創的な原子核・素粒子実験が実施されている。標的自体は Figure 1 に示すように純金ブロックで作られており、そのブロックが水冷配管付きの純銅ブロックへ接合されて間接的に冷却されている[1]。標的は、最大ビームパワーとして 50 kW までの operation が可能となっており、2015 年度中に 1600 時間程度、標的へのビーム照射運転を行っている。

標的自体では、1 次陽子および 2 次粒子による核破砕反応等により多くの放射性同位元素 (以下、放射性物質) が生成され、標的内に蓄積することとなる。仮に異常ビームの照射等により、溶融などといった標的の破損が起こった場合は、大量の放射性物質が標的より放出されることとなる。そのため、標的を納める標的容器は Figure 2 のように気密化され、またその周囲のビームラインと実験エリアの間も空気隔壁などにより気密化されるといった多重防護となっている[2][3]。標的容器中には不活性ガスとしてヘリウムガスが封入されている。標的容器の気密化に合わせ、2015 年度までに主に標的自体の健全性の監視の目的で、標的容器中のヘリウムガスをハドロン機械棟まで循環させる配管の建設およびガス循環装置の構築を行った。この循環装置には、ガス中の放射性物質濃度および核種を測定するための放射線測定器

としてゲルマニウム半導体型検出器 (以下、Ge 検出器) および NaI シンチレーション検出器 (以下、NaI 検出器) を備えている。放射線レベルの連続監視システムについては文献[4]にて開発されたものをベースにハドロン実験施設向けに一部改造したものを使用している。この報告書では主にヘリウム循環装置の設計、構築および運用状況について報告を行う。なお、本装置は、ハドロン実験施設における 2013 年 5 月に発生した放射性物質漏洩事故に対する対策の一環として導入されたものである。事故については[5]に詳しい報告が掲載されている。

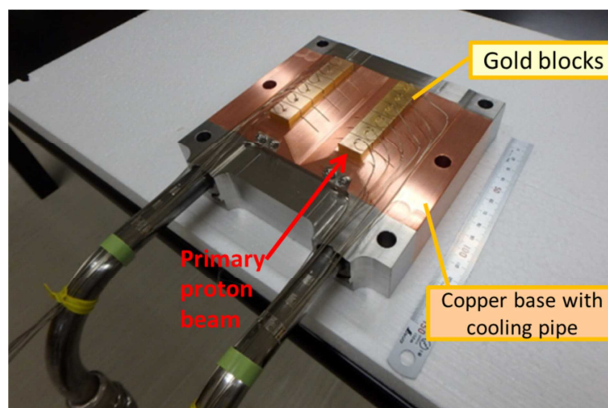


Figure 1: Photograph of the production target.

[†] nabe@post.kek.jp

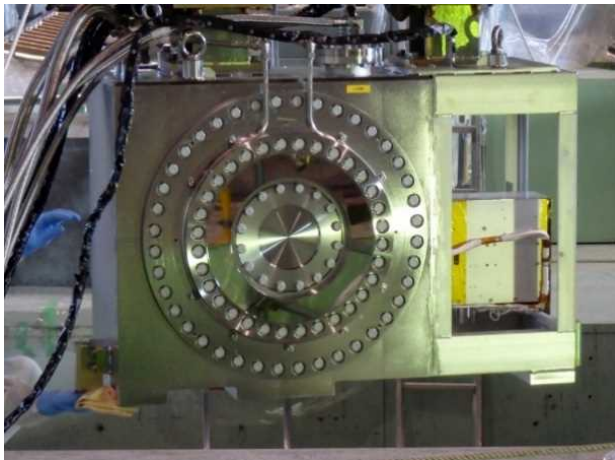


Figure 2: Photograph of the airtight target chamber.

2. ヘリウムガス循環装置の概念設計

ヘリウムガス循環装置に必要な要件は下記3項目である：

- (1) 放射性物質の閉じ込め。
- (2) ガス状態の監視（圧力、純度、放射性物質濃度）。
- (3) 異常発生時に速やかにガスを回収する。

まず、(1)放射性物質の閉じ込めのために、下記2つを規定している：

- ① 気密性：ヘリウムリークレートで 10^{-6} Pa · m³/sec 以下。
- ② ガスは負圧で循環させる：絶対圧 94 kPa 以下で運用。

リークレートは、放射能漏洩量から保守的に決定した。具体的には、仮に 50 kW、5000 時間運転後に標的が破損したとして、標的中に蓄積していた 62 TBq の放射能が標的から放出されたとする。それがヘリウムリーク量①と同じ割合で放射性物質が漏洩したとすると、1 時間の漏洩量は圧力差換算(漏洩後の圧力-漏洩前圧力)で $\Delta P=0.01$ Pa ($1/10^7$) となり、放射性物質の漏えいは 6.2 MBq となる。それが仮に全量実験ホール (7.4 万 m³) 側へ漏洩したとしても、空気中濃度は瞬間値でも空気濃度限度の 1/10 の 1% 以下、排気中濃度限度の 5% 以下となり法令に定められた制限値とくらべて十分に低い設定となっている。実際は、すべての放射性物質がヘリウムガスと同じ割合で漏洩するという仮定はやや過剰な想定であること、また 1 次ビームライン室と実験ホール間の空気隔壁により漏洩量は大幅に低減されること、およびビーム運転中は 7 万 m³/h 程度の空気で希釈されるなどから、①のリーク量制限はかなり保守的な設定と考えている。さらに、②の条件のようにヘリウムガスを“負圧”で循環させることで、閉じ込めの強化をはかっている。ヘリウムガス圧力は、絶対

圧で管理しており、本州に上陸する最大級の台風で想定されている最低気圧 95 kPa から 1 kPa のマージンを取って、絶対圧 94 kPa 以下で循環させるものとする。実際の運用では負圧にマージンを取って絶対圧 90 kPa 程度で行っている。また仮に①の最大リーク量 (10^{-6} Pa · m³/sec) があつた場合、1 年あたりの圧力上昇値は 0.2 kPa 程度であり、負圧維持の観点においても十分な気密性能といえる。

次に、(2)ガス状態の監視については、ガス圧力、ガス流量、ガス純度の測定、監視を行っている。ガス純度は、ヘリウムガスの純度および、ガス中の水分量を測定している。ヘリウムガス中の放射性物質濃度の測定は、ガス配管の外に Ge 検出器および NaI 検出器を置くことで、ガス中で放射性物質が崩壊する際に放出するガンマ線の計数率と核種分析を行うものとする。

(3)項の異常時におけるガス回収について、30 分以内に 99%以上のガスを回収することを規定している。前述したように気密性能から 1 時間程度の漏えい時間では空気中濃度限度などは問題とならないため、1 時間程度で回収すれば十分と考えられ、そこから factor 2 程度の安全をみて 30 分と設定している。実際は回収を始めればただちに強い負圧となり漏えい率が低下することから安全サイドの設定と考えられる。呼び排気速度 500 liters/min のスクロール型真空ポンプにより総延長 168 m の配管によりガス回収を想定したモデル計算を行った結果、30 分以内に 99 % (絶対圧 1000 Pa 以下に到達) とすると、KF25 (呼び径 20A) 程度の配管が必要となる。この計算結果から安全側として KF40 配管 (配管呼び径 32A) を選択した。ガス回収用のタンクの容量は運用上の観点から 3 回分以上のガス回収容量を備えるものとした。

3. 詳細設計と実装

概念設計をベースに設計をしたガス循環装置の概略のフロー図を Figure 3 に示す。大きな流れとして、標的容器からの出口を起点とすると、標的容器から出たヘリウムガスは 84 m の配管を通過して機械棟へ還り、そこでガスの一部を分岐させ放射線測定器へ流して放射性物質濃度を測定している。分岐したガスが本流へ合流した後、すべてのガスについてフィルタを通して不純物を取り除き、循環ポンプにより再度標的容器へ送られるという流れとなっている。循環ポンプの後段にはポンプでの圧縮によって加温されたガスを冷やすための熱交換器が置かれている。またガスの還り、送りおよびポンプの出口といった場所には圧力計や温度計などのセンサー類を備えている。

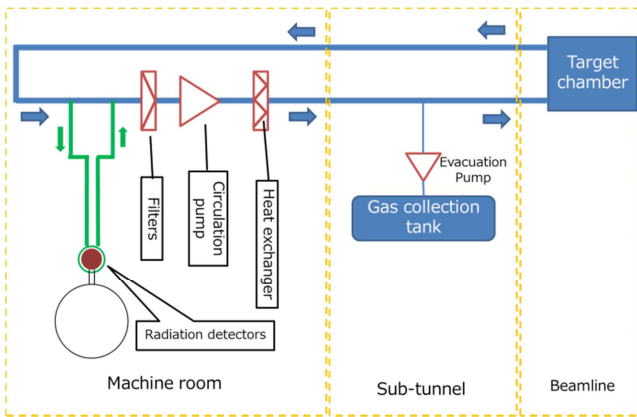


Figure 3: Schematic drawing of helium-gas flow.



Figure 4: Photographs of the gas pipes and the gas-collection tank in the sub-tunnel.

標的容器から機械棟までの配管長は約 84m である。配管材としては気密性、耐食性や溶接作業性の観点からステンレス製で継ぎ目なしのシームレス管を使用しており、現場で TIG 溶接を行い接合している。トンネルの建屋継ぎ目にある Expansion joint 部は、地震などで段差ができる可能性があるため、ブレード付フレキホースを使い、配管とフレキホースのフランジ接続部にはヘリコフレックス型メタルシールを使用している。すべての配管接続後に真空引きを行いヘリウムリーク試験により配管の気密性の確認を行った。

配管敷設区間であるサブトンネル内には、標的異常時にガスを回収するためのタンクが設置されている。タンクの設置場所は、運転時に人が近づくことがない場所で、かつ管理区域境界まで距離があり、その間に遮蔽となるもの（コンクリート壁等）が多い場所を選択した。仮に大量の放射性物質を含むガスをタンク中に回収したとしても、ユーザーなどを

被曝させる恐れがない。サブトンネル内のタンクおよび配管の一部の写真を Figure 4 に示す。タンクに圧力計および真空スイッチが取り付けられており、通常は真空状態であるがガスを回収した際にもタンク内は負圧が維持されるよう圧力値の閾値および真空スイッチの設定がなされている。なお、タンクの設置場所はクレーンなどの設備がなく手作業になること、また搬入口も通常の出扉のみと狭いことなどを勘案して、人力で運べる重量とサイズになるよう 12 分割とし、現場でフレキホースにより連結する構造とした。設置後ガス回収試験を実施した。その結果を Figure 5 に示す。ガス循環装置のガス圧力の低下曲線（赤線）から 99 % のガスを回収するのに要した時間は約 10 分であり仕様（30 分以内）を満たすことを確認した。Figure 5 には回収したタンク側の圧力値（青線）から回収後タンク側圧力は 24.6kPa（絶対圧）であり、最大約 4 回分程度のガス回収容量があることがわかる。

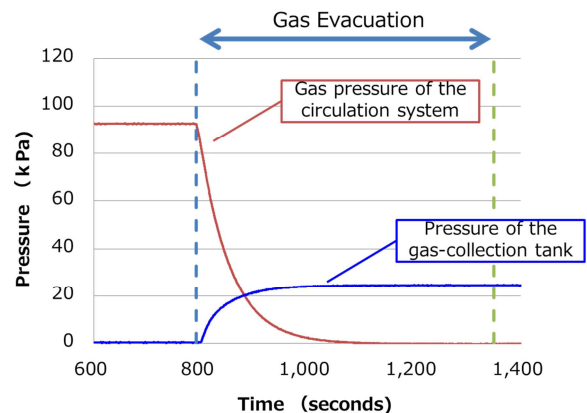


Figure 5: Result of the gas-evacuation test.

次に、循環装置の主要要素について具体的にまとめておく。循環ポンプにはオールメタル型ベローズポンプを採用している。これは接ガス部の材質およびボディシール部分はすべて金属製のもので、ヘリウムリークレートで 10^{-9} Pa・m³/sec 以下と気密性が良いのが特徴である。ガス循環量は 1 時間に 10 回程度の換気流量として 4 m³/hour 程度としている。そのうち放射線測定器側には 1/10 程度を分岐して流している。これは標的容器中のガスが 1 時間に 1 回放射線測定器側の配管を通る換算であり、Ge 検出器のスペクトル積算時間（1 時間）と同程度の設定となっている。

ポンプ前段にあるフィルタには、Figure 6 に示すようにプレフィルタ付き HEPA フィルタおよび活性炭フィルタの 2 段構成となっている。HEPA フィルタは 0.3 μm の粒子に対し 99.97 % の濾過効率である。仮に標的破損などで放射性物質が放出されると、エアロゾル形態の放射性物質は HEPA フィルタで、一部の有機ガス形態の放射性物質は活性炭フィルタ

で捕集されることとなる。その結果、大量の放射性物質の放出事象が発生した場合、フィルタ近傍の放射線量が高くなることが予想されることから、フィルタ周辺には厚さ 10 cm の鉄遮蔽体や鉛ブロック等で遮蔽を行っている。

センサーは、隔膜型圧力計、隔膜型差圧計、熱電対、水分露点計（インピーダンス式）およびヘリウム純度計（熱伝導率）から構成される。センサーからのデータは、機械棟にあるガス循環装置ローカル制御盤で読み出しを行い、そのデータを DA 変換して制御系の Programmable Logic Controller(PLC) の AD 変換モジュールで読み出すことで運転管理室においてトレンド情報などを表示させ監視を行っており、異常が検知された場合は警報が発報し、自動でビーム運転が停止するようになっている。各センサー類は、ヘリウムガス置換の際や異常発生時のガス回収の際にも健全性が維持されるよう、真空排気（負圧 1 気圧）に対応しているものを選択している。ヘリウムガスは負圧で循環させているが、リークが発生した場合に、外部空気がヘリウムガス中へ混入するためガス中の湿度（水分量）が増加することとなる。そこで水分露点計をつかって 1~10 ppm 程度の感度でリークを監視している。

放射線測定器は、Figure 7 に示すよう Ge 検出器を使用して、配管中からのガンマ線を測定している。測定システムは前述したよう文献[4]にて開発されたものをベースにハドロン実験施設向けに一部改造したものを使用している。Ge 検出器により核種分析と計数率の監視を行っており、次の条件で警報が発報しビーム運転が自動で停止するようになっている：

- (1) 40 keV~4 MeV までの積算の計数率が閾値を超えた場合。
- (2) 事前に指定した 10 核種個別の計数率が閾値を超えた場合。
- (3) 不感時間が 0 %、または 100 %に近い場合。
- (4) Ge 測定 PC とサーバー間の通信が行われていない場合。

上記の内、(1)はヘリウムガス中の全てのガンマ線放出核種の濃度を監視しており、(2)は特定核種の濃度を監視している。特定核種は事前に指定したもので、具体的な核種は次節にて説明を行う。(3)の不感時間 0 %は測定器が動作していないケースを想定しており、不感時間 100 %は計数率が高すぎる状態、つまり大量の放射性物質が放出された事象を想定している。なお、Ge 検出器のデータはリレーショナルデータベースで管理をしており、測定後は簡単にスペクトル情報を読み出して核種分析できる仕組みとなっている[4]。

Ge 検出器とは独立に、ガス配管近傍に NaI 検出器を設置してガンマ線計数率の監視を行っている。読み出しシステムも Ge 検出器とは独立で ORTEC

社のレートメータを使って計数率をアナログ電圧へ変換し、制御系 PLC の AD 変換モジュールで読み出している。特に NaI 検出器は Ge 検出器で対応しにくい高計数率事象(>1 MHz)、すなわち大量の放射性物質がヘリウムガス中に放出される事象にも対応できるようにレンジ設定をしている。

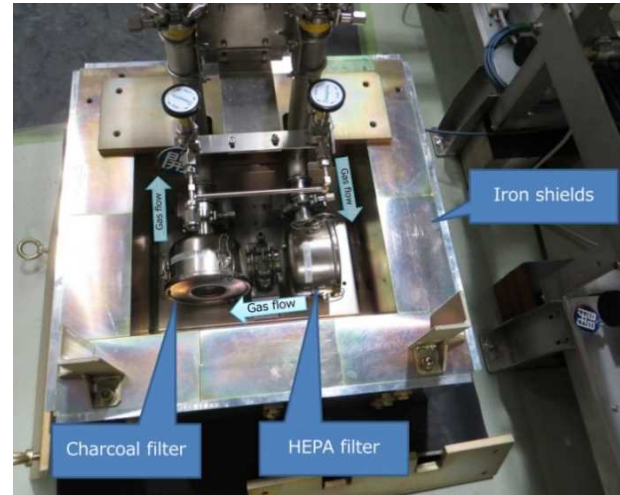


Figure 6: Photograph of the filter unit.

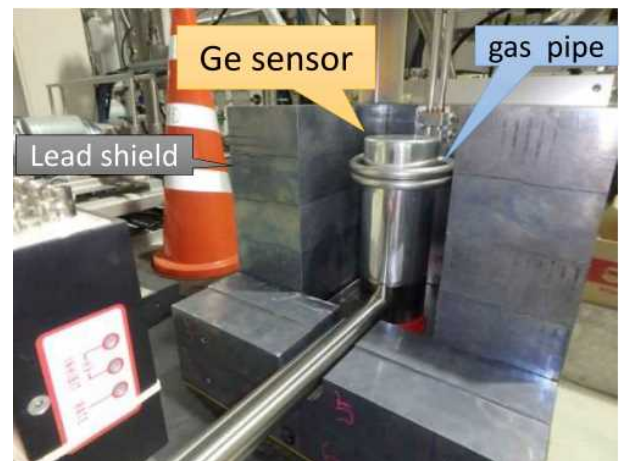


Figure 7: Photograph of the Germanium semiconductor detector. A helium-gas pipe surrounds the Germanium sensor.

4. 運用状況

ハドロン実験施設では、2015 年度に 1600 時間程度の標的へのビーム照射を行う運転を行った。ヘリウムガス循環装置はビーム運転中も含めて特に問題なく安定して稼働を続けている。Figure 8 には機械棟で測定しているガス圧力および標的容器中のガス温度の履歴の一部を示す。ビーム運転中（12 kW の矢印、24 kW の矢印の期間）はビーム運転に伴い、ガス温度が上昇し、その影響でガス圧力の増加が観

測されている。所々温度、圧力が低下している部分はメンテナンス等のためにビームが停止している期間である。また、理想気体の状態方程式から、標的容器分のガス温度が 1°C 変わると圧力変化 $\Delta P \sim 0.13$ kPa/°C 程度と予想されるが、測定データからは $\Delta P \sim 0.14$ kPa/°C となっており、ほぼ想定通りの挙動である。

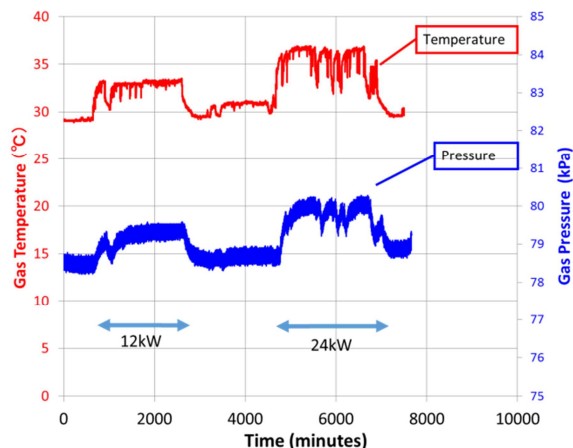


Figure 8: A part of operation history of the gas pressure measured in the machine room and the gas temperature measured in the target chamber.

放射線システムは、Ge 検出器、NaI 検出器および関連する PC サーバーおよび監視ソフトウェアについてビーム運転中一度もトラブルなく安定して稼働を続けている。Figure 9 に実際に測定されたガンマ線スペクトルの例を示す。十分なエネルギー分解能が得られており、多くの放射性核種が観測されていることがわかる。標的由来として考えられる重い核種の内、沸点が低くガス相へ移行しやすい水銀核種 (^{197}Hg または ^{192}Hg) やヨウ素核種 (^{121}I , ^{123}I) については Real time (オンライン) で濃度の監視を行い、異常放出があればすぐに警報が発報し、ビーム運転が自動で停止するよう制御されている。Figure 9 には標的由来と考えられる重い核種のピークも観測されているが、最大でも放射能で 0.5 kBq 以下、物質質量に直すと最大 10^{-9} g 以下と極めて微量なためマクロな健全性には影響はないレベルである。

主にヘリウムガス中の不純物とビームの相互作用により放射性核種となったと推定されるものとして比較的軽い核種である ^{23}Ne , ^{24}Ne , ^{10}C , ^{19}O , および ^{20}O などがある。ヘリウムガスは負圧のため、リークが発生すると空気由来(酸素、窒素、炭素、希ガス)の不純物が増えることから、ビーム運転中に重い核種の収量は変化せず、上記不純物に由来する核種の収量が変わったとすると、ガス循環装置系にリークがあると推定できる。このため炭素核種と酸素核種についても Real time の監視対象としている。リーク監視のためのガス系のセンサーとしては、主に水分露点計を使用しているが、これはオーダーとして 1 ppm レベル (10^{-6} g 程度) の監視能力である。それに対し、上記放射化分析ではオーダーとして 10^{-11} g 以下の感度があり、ビーム運転中のみの適用ではあるがリー

ク監視能力としては極めて感度が良いことがわかる。

5. まとめ

2015 年度までに標的の健全性を監視する目的でヘリウムガス循環装置や放射線測定システムの構築を行い、2015 年度中に 1600 時間程度、標的へのビーム照射運転を行った。これまで全システムは安定に稼働しており、また標的の健全性の監視に重要な役割を果たしている。今後、放射性核種の解析等を進めることで、標的状との相関関係やガス相への放出過程あについて理解を深め、監視能力の高度化をはかりたい考えである。

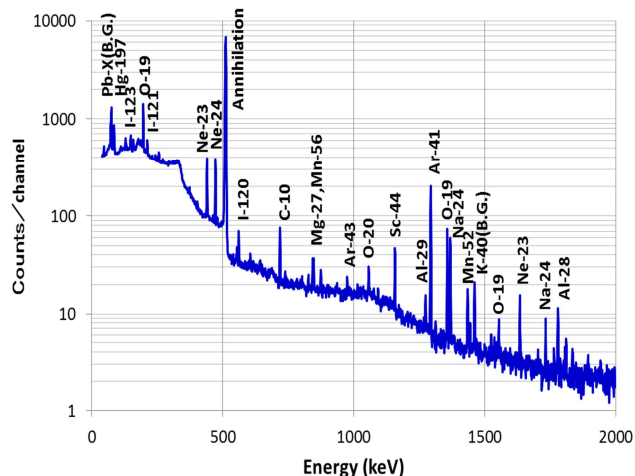


Figure 9: Example of a γ -ray spectrum measured by the Germanium semiconductor detector. “B.G.” in the figure means a background γ -ray from environment.

参考文献

- [1] H. Takahashi *et al.*, “Indirectly water-cooled production target at J-PARC hadron facility”, Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, Sep 2015, Vol. 305, Issue 3, pp 803-809.
- [2] 岩崎り 他, “J-PARC ハドロン実験施設における 2 次ビームライン開口部の気密強化”, 第 12 回加速器学会 Proceedings; http://www.pasj.jp/web_publish/pasj2015/proceedings/PDF/THP1/THP134.pdf
- [3] 広瀬恵里奈 他, “J-PARC ハドロン実験ホールのためのシールド貫通信号線ダクトの開発”, 第 12 回加速器学会 Proceedings; http://www.pasj.jp/web_publish/pasj2015/proceedings/PDF/THP1/THP133.pdf
- [4] Y. Kasugai, K. Otsu, and T. Kai, “MONITORING SYSTEM OF MERCURY TARGET FAILURE USING RADIOACTIVITY MEASUREMENT”, Proceedings of the ICANS-XIX, 19th meeting on Collaboration of Advance Neutron Source, Grindelwald, Switzerland, Mar. 8-12, 201.
- [5] J-PARC ハドロン実験施設における放射性物質漏えい事故関連情報; <http://j-parc.jp/HDAccident/HDAccident-j.html>