

( 続紙 1 )

京都大学	博士 (エネルギー科学)	氏名	坂部 俊郎
論文題目	Study on nuclear fusion reactions on the cathode surface of the glow discharge type of fusion neutron source (グロー放電型核融合中性子源の陰極表面における核融合反応に関する研究)		
(論文内容の要旨)			
<p>本論文は、グロー放電型核融合中性子源の陰極表面で発生する重水素同士の核融合反応を論じた内容をまとめたものである。この中性子源は、装置内の電極表面における反応の割合が高いことが知られており、本論文は複数の材料や構造を用いた試験を実施することで実験的にその影響を評価し、中性子源の高度化に対する指針を示した成果を報告するものであり、全 5 章からなっている。</p> <p>第 1 章は序論で、核融合反応に関する科学史の概要、放電型核融合中性子源の歴史・原理・用途について整理し、これらを基に設定した研究目的について記述している。グロー放電型核融合中性子源は、低圧力 (0.1~10 Pa 程度) の重水素雰囲気にてグロー放電を起こし、中性子発生を伴う核融合反応を起こす装置である。放電型核融合中性子源に関し、近年、主に電極表面で核融合反応が発生していることが明らかになっている。しかしながら、電極表面における重水素分布と中性子発生率の関係は明らかになっていない。本研究では、特に中性子発生への寄与が大きい陰極に着目し、陰極表面における重水素分布と中性子発生率の関係を明らかにすることを研究目的としている。</p> <p>第 2 章は、水素化物の形成が期待される材料の被覆をグリッド状の陰極 (基材: ステンレス鋼 304 (SUS304)) に施し、中性子発生試験を実施した内容を報告している。水素化物を形成することが期待される、チタン (Ti) とパラジウム (Pd) を被覆した陰極と被覆を実施しない陰極を用いて中性子発生試験を実施した。本章では、中性子発生率 (NPR) は、Ti 被覆陰極、SS304 陰極、Pd 被覆陰極の順で高くなった。Ti 被覆陰極の SS304 陰極に対する NPR の増加率は、試験全体を通じて 1.3~1.5 倍程度であり、バルクの Ti とステンレス鋼を比較した既往研究における増加率と同等であった。表面被覆により、バルク材料と同等の性能を引き出すことができることを示した。</p> <p>第 3 章は、陰極表面での核融合反応に焦点を当てるために開口部の無い球殻陰極 (基材:SUS304) を用いて中性子発生試験を実施した内容を報告している。ダイヤモンドライクカーボン (DLC) を被覆した陰極、Ti を被覆した陰極、被覆を施さない陰極 (SUS304 陰極) を準備し、中性子発生試験を実施した。さらに、重水素を含めた陰極表面からの深さ方向における元素分析をグロー放電発光分析法 (GD-OES) で実施した。中性子発生試験においては、</p>			

(続紙 2)

DLC 被覆陰極、Ti 被覆陰極、SUS304 陰極の順で NPR が高く、DLC 被覆陰極では、SUS304 陰極に対して、4.7～10 倍程度の NPR が確認された。これは荷電粒子の打ち込み深さの範囲での重水素濃度と相関を示した。すなわち、表面の重水素濃度を増加することにより、NPR を向上させることができることを実験的に明らかにした。

第 4 章は、陰極を低温に保つ水冷システムを新たに構築し、陰極の冷却が放電型核融合中性子源の運転に与える影響について報告している。本中性子源では、運転に係る電圧・電流が増加するにしたがって、陰極が高温になり、陰極上の重水素が脱離する。重水素の脱離は、高電流領域（本研究では 30mA を超える領域）において、電流に対する NPR の増加率の低下を招く。上記の水冷システムは、高電流領域における重水素脱離を抑制するために構築された。第 3 章と同様の球殻形状を持つ、DLC 被覆陰極と SUS304 陰極に水冷システムを適用し、中性子発生試験を実施した。両陰極において、初期試験において陰極冷却による NPR の向上が確認された。SUS304 陰極に関しては、実験日ごとに NPR が低下する結果となった一方で、DLC 被覆陰極を用いた試験では、試験期間を通じて NPR の向上が維持された。DLC 陰極では、50kV・60mA の条件において、水冷により 2.2 倍程度の中性子発生率の向上が確認された。水冷システムによる NPR の増加は、陰極表面の重水素の脱離の抑制によってもたらされることを示した。

第 5 章では、第 2 章から第 4 章にかけて得られた知見をまとめるとともに、これらの成果と既往研究の内容を統合することによって達成することが期待される中性子発生率に関する考察を示している。また、中性子発生率の増加による、中性子発生源の用途の拡大の可能性について論じている。

論文全体として、中性子源の性能向上において重要となる材料や構造を明らかにしており、今後も利用拡大が期待される中性子源の開発において学術的のみならず工学的にも重要な成果を報告している。

(続紙 3)

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、グロー放電型核融合中性子源の陰極表面における核融合反応による中性子発生に関して、実験を主体として電極の材料および構造の影響を検討した結果をまとめたものであり、全 5 章よりなる。中性子発生反応のもととなる重水素に対して親和性の高い材料を被覆材料に選定し、その影響を明らかにするとともに、水冷構造を導入することで特性をさらに向上できることを示しており、得られた主な成果は以下の通りである。

(1) 水素保持能の高い材料を陰極に被覆することにより、バルク材料を陰極に用いた場合と同等の性能を実現することが可能であることを明らかにした。

(2) 高エネルギーの重水素粒子の打ち込み範囲を含む、陰極表面の重水素分布を高めることにより、中性子発生率が向上することを実験的に明らかにした。また、チタンやステンレス鋼に対して、アモルファス構造を持つ炭素材料であるダイヤモンドライクカーボンが、中性子発生率および耐久性の面において、本中性子源の陰極材料として優位性を持つことを明らかにした。

(3) 中性子発生運転中に陰極を冷却し、温度上昇による陰極上の重水素の脱離を抑えることにより、中性子発生率を向上させることができることを明らかにした。さらには、水冷時には、中性子発生率と電流の間に高い線形性が確認された。この結果は、中性子発生率の制御性の向上に寄与するものである。また、陰極冷却システムの採用により、陰極への熱負荷を軽減することができるため、運転範囲の拡大や陰極寿命の延伸といった効果が期待できる。

(4) (1)~(3)より、システムの簡易性という当該中性子源の利点を損なうことなく、既往研究と同等の電気入力条件において、重水素運転では  $10^8 \sim 10^9$  台の中性子発生率、重水素と三重水素を用いた運転では  $10^{10}$  台の中性子発生率が期待できることを示した。

本成果は、中性子源の挙動原理の解明のみならず、応用拡大に貢献する独創的な成果であり、学術上、實際上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士(エネルギー科学)の学位論文として価値あるものと認める。また、令和 6 年 2 月 19 日実施した論文内容とそれに関連した試問の結果合格と認めた。

なお、本論文は、京都大学学位規程第 14 条第 2 項に該当するものと判断し、公表に際しては、当該論文の全文に代えてその内容を要約したものとすることを認める。

論文内容の要旨、審査の結果の要旨及び学位論文の全文は、本学学術情報リポジトリに掲載し、公表とする。ただし、特許申請、雑誌掲載等の関係により、要旨を学位授与後即日公表することに支障がある場合は、以下に公表可能とする日付を記入すること。

要旨公開可能日： 2024 年 6 月 24 日以降