

(続紙 1)

京都大学	博士 (エネルギー科学)	氏名	柴田 敏宏
論文題目	LONG TERM BEHAVIOR OF TRITIUM RELEASED FROM NUCLEAR FUSION PLANT IN THE ENVIRONMENT AND ITS IMPACT ASSESSMENT MODEL		
(論文内容の要旨)			
本論文は、核融合プラントを想定した大量トリチウム取扱い施設の運転に伴う定常的な放出トリチウムについて、その環境における挙動を、個々の存在状態をコンパートメントとして取扱い、各コンパートメント間の移行関数、係数を規定し、それに基づいてその周辺公衆への被ばく影響をモデル計算により分析したものである。主として数値シミュレーションによる他、一部の特に重要な移行挙動については実験的検証を行って、総合的な評価を定量的に行ったもので、全5章よりなる。 序論である第1章ではエネルギー源としての核融合プラントの意義と位置づけ、特に核分裂原子力と比較しての特徴を考察した。運転に伴い、法定限度内であっても定常的に水素の同位体放射性核種であるトリチウムを放出することに伴い、長期、広域にわたる公衆の低線量被ばく量と、環境におけるトリチウム濃度の上昇を、定量的に評価する必要があることを指摘している。特に、トリチウムが水分子（HTO）として環境及び生態系を移行することから、物理的な拡散過程に加えて、多種の移行経路とメカニズムを総合的に扱うコンパートメントモデルと、それによって着目すべき重要なリスクを抽出する影響経路解析の方法論を論じている。 第2章では、コンパートメントモデルによるトリチウムの影響経路解析によって、定常的なトリチウム放出のもっとも重要な影響として拡散、蓄積現象を評価した。、使用したコードNORMTRIの原型は欧州の大陸上を想定し、単年度放出量によって限度が規定される条件での解析を行うのに対し、100年までの長期にわたり、海洋などの大規模解放水面の影響を評価できるよう改良を加えた。初期のトリチウム移行はガウスプルームモデルで解析し、その後は生態系、農業や食糧により我が国固有の環境を記述した。その結果、数10年にわたり環境中でトリチウム濃度は増加を続けること、施設からの放出量 1g/年あたり、公衆の被ばくが最大で 10μSv/年レベルであること、を示した。被ばくに最も影響する経路は農作物を主とする経口摂取であった。また、海洋などの水面の存在が、この蓄積を大きく減ずる効果を持つことを明らかにした。この海洋の効果は、空気中のトリチウム水蒸気が水と交換し、大きな希釈を受けることによって起こり、そのシンクとしての機能により、影響は隣接する陸地での蓄積も制限することを示した。 第3章では、この水面による蓄積抑制効果が、数値モデルで仮定した水面への沈着とそれに続く同位体希釈によることから、実効的な大気から水面への移行係数の影響を実験と計算の比較により求めている。放出源の海浜立地を仮定した場合、ガウスプルームモデルでは、プルームの水面による反射または吸収の仮定により、陸域を含む環境でのトリチウム蓄積には大きな影響を生じる。一方実験においては、			

密閉容器中でトリチウム水蒸気の液面への沈着速度を求め、それが水面付近での攪拌と水面の揺動に大きく影響されることを見出した。沈着速度は 0.02 m/s から 0.15 m/s の間で大きく変化しており、シミュレーションではこのパラメータが環境中、解放水面上でのトリチウムの移行に大きな影響を与えることが示されている。この結果は、実環境における大気から水面への移行を実測してモデルに反映する必要があることを示した。また、施設からの放出に際して同位体希釈を有効に利用することで環境影響が低減できる可能性を示唆した。

第4章では、第2章において長期定常での公衆の被ばくが主としてトリチウムを含有する食物であることが見出されたことを受け、トリチウム経口摂取に対する、体内自由水への移行とDNA分子への移行の差異を評価した。コンパートメントモデルにおいてトリチウムの細胞内DNAへの移行経路を追加し、大腸菌を用いてトリチウム標識化合物を用いた実験により、トリチウムの糖と水経路からのDNAへの移行量の差を求めた。その結果、トリチウム水の摂取では全身に均等にトリチウム水が分布すると考えられるのに対し、DNAへの移行は糖を経由しない場合は極めて少ないことを見出した。低線量被ばくがDNA損傷に起因する発癌リスクに関連することと生体内のトリチウムβ線の飛程を考慮すれば、現在同じ預託実効線量当量とみなされる被ばくに対して、トリチウムの摂取経路により、DNA損傷に至る影響量が異なりうるという知見が得られた。DNA分子への移行経路では、同じ経口摂取でも特に穀類を経由する経路が主要であることが示された。

第5章では、本研究において得られたトリチウム定常放出源としての核融合炉の長期での影響を総合的に論じ、設置されるサイト、環境のみならず産業や食生活によって、公衆が受ける放射線リスクの評価方法論をまとめている。放出トリチウムが法定限度等を下回る場合、環境での蓄積量とその与える被ばく量はバックグラウンドや医療放射線によるものと比べても極めて少ないが、検出可能であり、またその挙動は複雑である。本研究の成果により、その経路は大略定量的に分析可能であり、また実験や実環境のモニタリングによりその評価精度を上げる必要があること、得られた影響経路の知見から、施設設計上より影響を低減するための有効な方法を選択しうるということが明らかにされている。加えて、放射性物質を必然的にとまなう核エネルギー利用においては、放射性物質が環境、公衆、社会に与える影響を、その移行経路、影響メカニズムを含めて把握し、リスクの低減と制御を行う必要があること、さらにその結果を広く社会の理解と的確な判断に資するべきことを結論している。

(続紙 2)

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、将来のエネルギー源として期待される核融合プラントを想定したトリチウム取扱い施設からの通常運転に伴う放出について、環境から公衆に至る経路を記述・分析するモデルを構築して検討した結果、従来十分認識されていなかった影響を見出し、さらにそのモデルの主要部分について実験結果を加味して定量的な評価を行うことで、トリチウムに特徴的な挙動を研究した結果をまとめたもので、得られた主な成果は次のとおりである。

1. トリチウムに固有な環境挙動として、水圏を含む同位体交換や生態系での代謝を含む影響経路を連続的網羅的に追跡する、コンパートメントモデルに基づく解析手法を構築し、定常、長期間にわたる放出の評価分析を行った。その結果、トリチウムが放出限度内でその濃度は自然バックグラウンドを大きく下回るものの広範に拡散しながら環境中で蓄積し、定量的にその濃度が約60年で初年度の20倍程度で飽和することを示した。また、放出プルームが海洋水面に吸収される条件では同位体希釈効果により、この蓄積効果が著しく減ずることを見出した。また、公衆の被ばくが主に食物を通じた経口摂取によるものであることを示した。
2. 気相中のトリチウム水蒸気と水面の間の交換速度を測定し、モデルの検証を行った結果、施設からの放出トリチウムの水圏への移行が水面付近での混合に大きく影響されることを見出し、その結果環境中のトリチウム濃度を規定する沈着速度が自然条件に依存することを示した。
3. コンパートメントモデルにおいてトリチウムの細胞内DNAへの移行経路を追加し、大腸菌を用いた実験により、生体への取り込みは水と糖などの化学形態によってDNA移行に差異があり、したがって農作物などの経路により、同じ預託実効線量当量に対しても生体中での分布と影響が違いうることを示した。
4. 以上の結果から、定常的なトリチウム放出源についてその長期的な環境影響を定量的に分析評価する方法を示し、そのモデルで記述される放出経路、形態から、より詳細かつ定量的に影響を制御しうることを明らかにして、放射線リスクを合理的に管理し、核融合エネルギーの環境適合性、社会受容性を高めるための方法を示した。

以上、本論文は、従来の原子力施設の影響評価とは異なる視点と方法論に基づく、少量トリチウムの定常的放出に基づく環境生態系への影響を明らかにし、エネルギー供給源としての核融合プラントの特性を分析するとともに、その方法論を通じて核融合工学とエネルギー科学に大きく貢献するもので、得られた成果は、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、平成25年1月18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。