

## 1. 放射能汚染廃棄物の問題の概要

### 1.1 放射性物質による廃棄物の汚染事象

原発事故に伴い放出された放射性物質はエアロゾルなどの形で広域に移流拡散し、降雨に伴って地上に降下沈着しました。現在、環境放射能のほとんどを占めている放射性セシウムは、降雨に溶けてイオンの形で降り注いだと考えられます。文部科学省が行った航空機モニタリングの結果では、福島県内だけでなく、県外の広範囲に汚染が進んでいることが明らかとなりました。関東圏域でも、千葉県の北西部や栃木県、群馬県の山麓部など、高線量地域が分布しています。高線量地域では、放射性セシウムを含むごみが一般廃棄物の焼却施設に混入し、高濃度の焼却灰が発生しています。これは、日常生活の中で放射性セシウムを含む土壌が付いた雑草を除去したり、葉や樹皮に放射性セシウムが付いた樹木等を剪定するなどした際に生じた草木類のごみに起因するものです。

合流式下水道では、放射性セシウムが付着した地上部の土壌粒子が懸濁物として下水道に流入し、終末処理場において下水汚泥に濃集しました。上水の場合も同様に、取水域に懸濁物が流入し浄水過程で上水汚泥（浄水発生土）中に濃集しました。それ以外にも、降下物の付着による稲わらや腐葉土なども問題になっています（図 1.1 参照）。

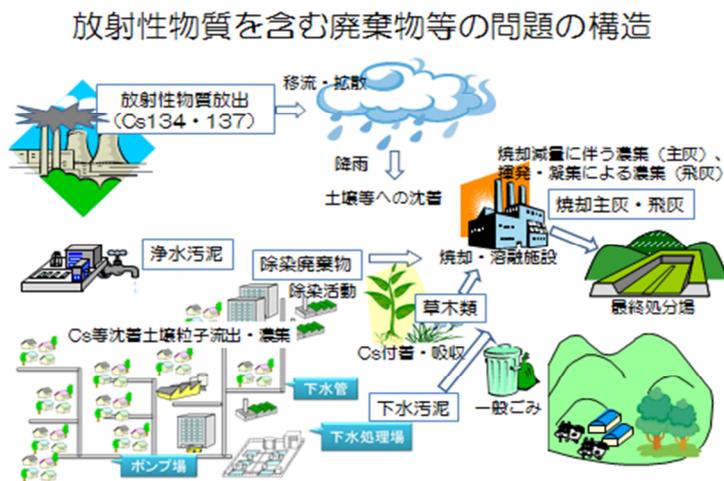


図 1.1 放射性物質に汚染された廃棄物の発生事象の機序の概要

### 1.2 これまでの国等の動き

表 1.1 に放射性物質によって汚染された廃棄物の問題に対する国等のこれまでの動きを時系列的に示しました。原発事故による汚染の実態が不明であった当初は、主に福島県内に目が向けられ、福島県内の災害廃棄物が放射性物質によって汚染されているおそれがあったことから、その実態把握と対処が検討されました。2011年5月2日に環境省から「福島県内の災害廃棄物の当面の取り扱い」の通知が出され、その後、放射性物質に汚染された災害廃棄物をどのように処理していくべきかについて検討していくために、「災害廃棄物

安全評価検討会」が環境省に設置され、5月15日に第一回会合が開催されました。

一方、災害廃棄物よりも先に顕在化したのは、下水汚泥の問題でした。5月1日に福島県内の下水処理場から発生する下水汚泥及びその焼却灰等の放射能濃度が高いことが報告され、その後福島県外からも同様の報告事例が相次ぎ、さらに高濃度の浄水発生土が広域的に生じていることも明らかになりました。そこで、6月16日には原子力災害対策本部から関連省に「放射性物質が検出された上下水処理等副次産物の当面の取り扱いに関する考え方」が通知され、同月17日に国土交通省においても「下水道における放射性物質対策に関する検討会」が発足しました。同通知は、6月3日に原子力安全委員会が発出した「東京電力株式会社福島第一原子力発電所事故の影響を受けた廃棄物の処理処分等に関する安全確保の当面の考え方について」を元に作成されたものです。8,000Bq/kg以下の上下水処理等副次産物（下水汚泥及びその焼却灰、浄水発生土等）を通常の管理型処分場で埋立可能とする技術基準はこの時点で示されました。

環境省では、災害廃棄物安全評価検討会で検討を重ね、先述の6月3日の原子力安全委員会の示した考え方も踏まえながら、6月23日に「福島県内の災害廃棄物の処理の方針」を発出しました。この通知で、上下水処理等副次産物と同様に、8,000Bq/kgの埋立基準（管理型処分場で埋立可とする基準）が示されました。

一方、東京都江戸川清掃工場や柏市の清掃工場で高い放射能濃度の焼却灰が発生していることが判明し、福島県外の空間線量の高い地域でも、一般廃棄物への放射性物質の混入が明らかとなりました。この事象は、放射性物質を含む草木類等に主に起因しており、放射性物質による汚染は災害廃棄物以外の「一般ごみ」まで及んでいたのです。そこで環境省では、東日本の16都県に実態把握のための緊急調査を要請するとともに、放射性物質を含む焼却灰について6月23日の福島県内の災害廃棄物に対して示した方針に準じて取り扱うよう指示しました。その後、いくつかの技術的事項に関する通知を発出し、8月11日には、「災害廃棄物の広域処理の推進について（東日本大震災により生じた災害廃棄物の広域処理の推進に係るガイドライン）」を発出し、宮城県及び岩手県で発生している災害廃棄物の広域的処理を進めるにあたっての安全確保の考え方を示しました。8月29日には焼却灰の調査結果を公表するとともに、「一般廃棄物処理施設における放射性物質に汚染されたおそれのある廃棄物の処理について」を通知しました。ここでは、焼却処理や8,000Bq/kg以下の焼却灰等の埋立における安全確保について示し、施設におけるモニタリングなどについて指示しました。8月31日には、「8,000Bq/kgを超え100,000Bq/kg以下の焼却灰等の処分方法に関する方針について」の通知が発出され、8,000Bq/kgを超える高濃度の廃棄物の埋立方法が示されました。

以上のように、放射性物質に汚染された廃棄物の処理については、環境省を中心にした対応がなされてきましたが、廃棄物処理法の延長上で対処していくことには限界があり、国として新たな法的枠組みをつくる必要性に迫られました。そこで、放射性物質に汚染された廃棄物の処理と土壌等の除染の二本柱からなる特別措置法（放射性物質汚染対処特別

措置法) が 8 月 30 日に公布・施行され、11 月 11 日には法に基づく基本方針が閣議決定されました。10 月 29 日には、中間貯蔵施設等の基本的考え方(「東京電力株式会社福島第一原子力発電所事故に伴う放射性物質による環境汚染の対処において必要な中間貯蔵施設等の基本的考え方について」)の中で、福島県内における中間貯蔵施設設置のスケジュールや、福島県外では指定廃棄物を既存の管理型処分場で処分していく方向性が示されました。

12 月 14 日には、法を運用していく上で必要な政省令(施行令・施行規則)が公布されました。環境省令(施行規則)では、各種の技術基準が示されており、技術基準に則って適正な処理を進めていくために必要なガイドラインも 12 月下旬に示されました。

以上のような特措法に基づく各種のルール等が体系的に整備され、2012 年 1 月 1 日から本格施行となりました。法の本格施行後は、未設定であった各種の技術基準が順次設定、告示されるとともに、環境省内の組織体制も拡充され、法に基づく適正処理の推進が図られました。しかし現在においても、8,000Bq/kg を超える焼却飛灰を中心とした指定廃棄物の最終処分先確保、福島県内の中間貯蔵施設立地など、難題は山積の状態です。

8,000Bq/kg 超の指定廃棄物の処分については、当初は既存の最終処分場の活用に向けて検討、調整を尽くしましたが、地元自治体、地域住民の強い反対から遅々として進まず、やむなく国においては、福島県外の各県の国有地に最終処分場を確保することを方針として示し(2012 年 3 月 30 日)、9 月には栃木県と茨城県について立地候補地を公表しました。しかし、候補地選定に関する手続きへの不信等もあり、政権交代を機に手続きが見直され(2013 年 2 月 25 日)、2013 年現在、新たな立地選定プロセスに基づいて慎重な議論が行われています。

一方、福島県内は 2012 年 8 月に除染による除去土壌と 10 万 Bq/kg 超の汚染廃棄物の搬入先である中間貯蔵施設の調査候補地が公表され、10 万 Bq/kg 以下の処分は富岡町の民間最終処分場を活用する方向が示されました。以上のような立地問題においては、現在、地元の理解と合意形成に向けた国による調整が続けられています。中間貯蔵施設のイメージ、安全対策の考え方については、後述します。

その他、労働者の被ばく防止の観点からは、除染活動の本格化に合わせて、2012 年 1 月から「除染電離則」が施行されましたが、放射性物質を相当程度含む廃棄物の処理に従事する労働者については、対応が曖昧な状況のまま手が付けられていませんでした。意識の高い現場では、従来の電離則の基本的な考え方に準じて必要な管理を行っていましたが、2013 年 7 月 1 日から廃棄物処理の実態に則した改正電離則が施行されました。

表 1.1 これまでの国等の主な動き

環境省が主体となった動き	その他の主な動き
<p>「福島県内の災害廃棄物の当面の取り扱い」(5月2日)</p> <p>「災害廃棄物安全評価検討会」設置(5月15日)</p> <p>「福島県内の災害廃棄物の処理の方針」(6月23日)</p> <p>「一般廃棄物焼却施設における焼却灰の測定及び当面の取扱いについて」(6月28日)</p> <p>「災害廃棄物の広域処理の推進について(東日本大震災により生じた災害廃棄物の広域処理の推進に係るガイドライン)」(8月11日)</p> <p>「一般廃棄物処理施設における放射性物質に汚染されたおそれのある廃棄物の処理について」(8月29日)</p> <p>「放射性物質汚染対処特別措置法」公布(8月30日)</p> <p>「8,000Bq/kg を超え100,000Bq/kg 以下の焼却灰等の処分方法に関する方針について」(8月31日)</p> <p>「環境回復検討会」設置(9月14日)</p> <p>「東京電力株式会社福島第一原子力発電所事故に伴う放射性物質による環境汚染の対処において必要な中間貯蔵施設等の基本的考え方について」(10月29日)</p> <p>放射性物質汚染対処特別措置法基本方針閣議決定(11月11日)</p> <p>放射性物質汚染対処特別措置法施行令(政令)・施行規則(環境省令)(平成23年12月14日)</p> <p>除染関係ガイドライン(第1版)発出(平成23年12月14日)</p> <p>廃棄物関係ガイドライン(第1版)発出(平成23年12月27日)</p> <p>特別措置法本格施行(2012年1月1日)</p>	<p>福島県内の下水処理場から発生する下水汚泥等の放射能濃度が高いことを報告(5月1日)</p> <p>「東京電力株式会社福島第一原子力発電所事故の影響を受けた廃棄物の処理処分等に関する安全確保の当面の考え方について」原子力安全委員会(6月3日)</p> <p>「放射性物質が検出された上下水処理等副次産物の当面の取り扱いに関する考え方」原子力災害対策本部(6月16日)</p> <p>「下水道における放射性物質対策に関する検討会」が国土交通省に発足(6月17日)</p> <p>東京都江戸川清掃工場や柏市の清掃工場で高い放射能濃度の焼却灰が発生していることが判明(6月下旬)</p> <p>厚生省「除染作業等に従事する労働者の放射線障害防止に関する専門家検討会」設置(10月21日)</p> <p>東京都が広域処理として岩手県の災害廃棄物を受入開始(11月初旬)</p> <p>厚生労働省「除染電離則」施行(平成24年1月1日)</p>

<p>指定廃棄物の今後の処理方針発出（3月30日）</p> <p>災害廃棄物に関する広域処理の基準等についての告示（4月17日）</p> <p>福島県内中間貯蔵施設調査候補地公表（8月19日）</p> <p>栃木県及び茨城県指定廃棄物最終処分場候補地公表（9月3日及び9月27日）</p> <p>指定廃棄物の最終処分場候補地の選定に係る経緯の検証及び今後の方針（平成25年2月25日）</p> <p>中間貯蔵施設安全対策検討会及び環境保全対策検討会設置（平成25年6月28日）</p> <p>福島県及び大熊町等4町への中間貯蔵施設の設置及び管理型処分場の活用に関する受け入れの要請（平成25年12月14日）</p>	<p>厚生労働省「改正電離則」施行（事故由来汚染廃棄物等の処分関係）（平成25年7月1日）</p>
---	---

### 1.3 放射性物質汚染対処特別措置法

#### 1.3.1 法律のポイント<sup>1)</sup>

放射性物質汚染対処特別措置法、正確には、「平成二十三年三月十一日に発生した東北地方太平洋沖地震に伴う原子力発電所の事故により放出された放射性物質による環境の汚染への対処に関する特別措置法」と言います。以下、特措法と略しますが、主要なポイントを以下に示します。

- (1)汚染廃棄物の処理と、除染およびそれに伴う除去土壌の処理の二本柱のフレームで汚染対処の措置が講じられること
- (2)国が原子力政策を推進してきた責任を認め、国の責務の下、あらゆる必要な措置が財政面を含め国主導で講ぜられること(第三条)
- (3)特措法に基づいて講ぜられた措置は、関係原子力事業者(東京電力)の負担の下に実施され、その費用を関係原子力事業者に請求・求償できるとされたこと(第四十四条)
- (4)汚染の程度が高い地域(「汚染廃棄物対策地域」,「除染特別地域」)あるいは廃棄物(汚染の程度が高い「指定廃棄物」および対策地域内廃棄物を合わせて「特定廃棄物」という)は、国の責任で除染措置や除去土壌・廃棄物の処理を行うが、汚染の程度が低い場合は、市町村あるいは事業者が実施すること
- (5)上記(4)の、汚染の程度は低い放射性物質に汚染されあるいはおそれのある廃棄物は、「特定一般廃棄物」または「特定産業廃棄物」として、特別の処理基準、維持管理基準が適用されること(第二十三、二十四条)

#### 1.3.2 基本方針のポイント<sup>2)</sup>

特措法に基づく今後の事故由来放射性物質汚染への対処のために、基本方針が策定され

ました(11月11日閣議決定)。廃棄物の処理に関する基本的な考え方において特記すべきポイントのみ以下に示します。

- ①住民の生活の妨げとなる廃棄物の処理を優先
- ②現行の廃棄物処理法に基づく廃棄物の処理体制、施設等を積極的に活用
- ③安全性を確保しつつ、可能な限りにおいて減容化、廃棄物の再生利用を図る
- ④高濃度の汚染廃棄物が相当量発生している都道府県においては中間貯蔵施設を確保し、それ以外では当該都道府県内で処理を行う。
- ⑤中間貯蔵施設および最終処分場の確保やその安全性の確保については、国が責任をもって行う。当該施設の確保に当たっては、環境影響の評価等を行う

### 1.3.3 中間貯蔵施設設置等のロードマップ<sup>3)</sup>

事故由来放射性物質に汚染された廃棄物の適正処理を推進していくためにもっとも重要な要素は「出口」、すなわち最終処分場等の確保と今後のスケジュールの設定であり、福島県および県外について中間貯蔵施設の設置等のロードマップが示されました(2011年10月29日)。福島県内外の特定廃棄物(対策地域内廃棄物および指定廃棄物)及び除染に伴う廃棄物等の処理フローについては、福島県内外ともに10万Bq/kg以下の特定廃棄物は、都道府県内の管理型最終処分場で処分、10万Bq/kg超については、福島県内では中間貯蔵施設(一定の期間、安全に集中的に管理・保管する施設)において貯蔵、その後には県外で最終処分、福島県外の10万Bq/kg超については当該都道府県の遮断型処分場で処分する方針となっています(なお、その後の2012年3月30日に、福島県外においては既存処分施設を優先的に活用しつつ、別途に国が遮断型の最終処分場を設置し、8,000Bq/kg超の指定廃棄物を処分する方針が示されました)。

また、今後の福島県内の処理のスケジュールについては、以下のとおりです。

- ・ 中間貯蔵施設は仮置場への本格搬入から3年以内に供用開始(平成24年度内に立地場所を選定、平成27年1月から順次搬入開始)
- ・ 県外の最終処分は、中間貯蔵開始後30年以内に完了

### 1.3.4 環境省令(施行規則)

特別措置法を円滑に運用するために、技術的事項等の基準について環境省令で定められました。以下に、主要なポイントのみ整理します。

#### (1)汚染廃棄物対策地域

国がその地域内にある廃棄物の収集、運搬、保管および処分を実施する必要がある地域として、警戒区域または計画的避難区域を指定

#### (2)指定廃棄物

指定基準は、セシウム134(以下<sup>134</sup>Cs)およびセシウム137(以下<sup>137</sup>Cs)の放射能濃度の合計値が8,000Bq/kgを超えるもの。指定廃棄物は国がその処理を行う。環境省令において、

指定廃棄物への該当性を判断するための調査方法及び申請方法などが規定されている。

(3)特定廃棄物(対策地域内廃棄物および指定廃棄物)の保管および処理基準

放射性物質の影響に関して、一般公衆の放射線被ばく管理の観点から特別な配慮が必要な事項を規定。とくに、指定廃棄物の最終処分場(管理型処分場)については、厳重な技術基準を上乗せで適用。焼却施設においては高度な排ガス処理設備を有することとされたが、ダイオキシン類の排出基準に対応している現在の施設性能で十分担保される。さらに、中間処理における排ガスまたは排水、および最終処分における放流水の監視によって周辺の大気中または公共の水域における水中の基準は以下のとおり(図1.2参照)。

一 大気中の放射性物質の濃度限度(3月間平均)

$$^{134}\text{Cs} \text{ の濃度(Bq/m}^3\text{)} / 20(\text{Bq/m}^3\text{)} + ^{137}\text{Cs} \text{ の濃度(Bq/m}^3\text{)} / 30(\text{Bq/m}^3\text{)} \leq 1$$

一 水中の放射性物質の濃度限度(3月間平均)

$$^{134}\text{Cs} \text{ の濃度(Bq/L)} / 60(\text{Bq/L)} + ^{137}\text{Cs} \text{ の濃度(Bq/L)} / 90(\text{Bq/L)} \leq 1$$

また、特定廃棄物には廃棄物処理法は適用されないが、廃棄物処理法における生活環境保全の観点から遵守すべき技術的事項を基準として含んでいる。

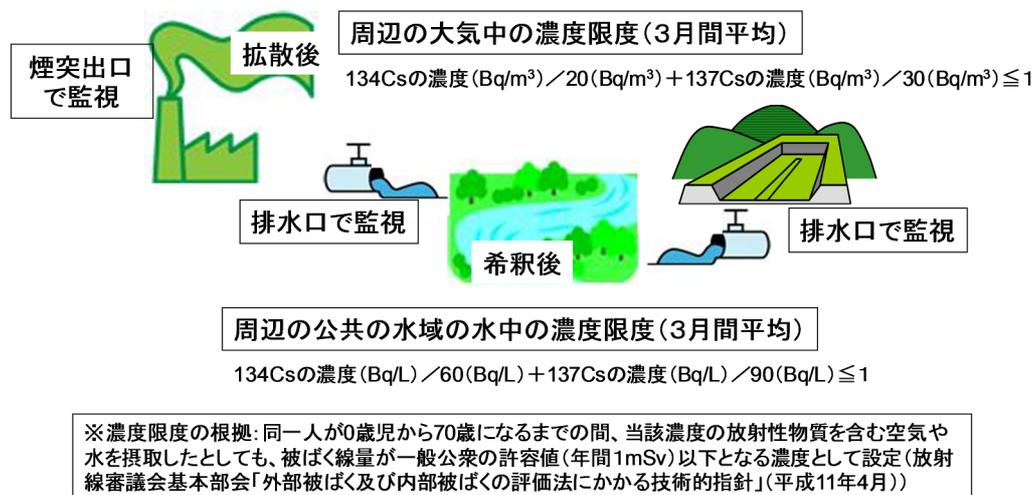


図 1.2 焼却施設および埋立処分場の排ガスおよび排水の監視  
 ～濃度限度は排出口基準ではなく、周辺環境における基準～

(4)特定一般廃棄物及び特定産業廃棄物

特定廃棄物ほどに高濃度に汚染はされていないが、事故由来放射性物質に汚染され、あるいは汚染されたおそれのある廃棄物は、特別な処理基準を適用する特定一般廃棄物、特定産業廃棄物とされている。該当する都道府県から発生するばいじん、燃え殻、汚泥等の廃棄物の種類で規定されるとともに、都道府県の限定のない廃堆肥、稲わら、除染実施地

域から除染により発生する除染廃棄物が該当する（平成24年11月9日に環境省令改正により、都道府県の限定の範囲がばいじん以外が見直されるとともに、廃堆肥、廃稲わらについては都道府県が限定された）。

また、特定一般廃棄物および特定産業廃棄物を受け入れる焼却等の熱的処理を行う中間処理施設および最終処分場、または指定された都道府県に存在する中間処理施設は、廃棄物処理法に基づく基準に加えて、放射性物質汚染への対処の観点から上乘せの処理基準と維持管理基準が適用される。その上乘せ基準は、特定廃棄物の処理基準ほどに厳重ではないものの、一定の配慮すべき事項が規定された。とくに、最終処分場においては、50cm以上の土壌層を廃棄物層の下部に敷設すること（溶出性がない廃棄物については除外）、さらにばいじんについては、上部に不透水層を設置し、降雨浸透を防止することが義務化された。排ガスおよび排水（放流水）についても、特定廃棄物と同様の維持管理基準が適用される。

## 1.4 中間貯蔵施設の現状と課題

### 1.4.1 位置づけ

福島県内の除染によって生じた除去土壌や10万 Bq/kg 超の廃棄物は、中間貯蔵施設に搬入されることとなっています（図 1.3 参照）が、調査候補地の選定は行われ、現在は具体的な調査と基本設計等の議論が進行中です。関係者の努力は続けられていますが、当初のスケジュールどおりに進むには厳しい状況にあります。ちなみに、10万 Bq/kg 以下の廃棄物については、富岡町に立地する民間管理型埋立処分場での処分を念頭に置いた調整が進んでいます。ここでは、福島県内の今後の除染や汚染廃棄物等の処理進展の試金石である中間貯蔵施設について、公表されている資料の範囲内ではありますがその概要を紹介し、また今後に向けて技術的課題を中心に説明します。

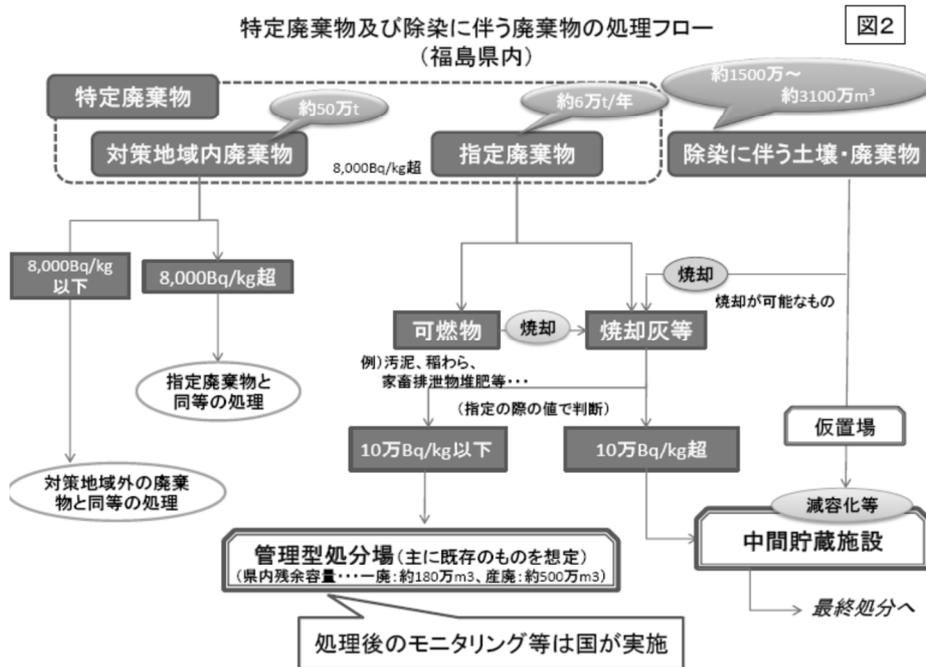


図 1.3 福島県内の特定廃棄物及び除染に伴う廃棄物等の処理フロー

#### 1.4.2 中間貯蔵施設の概要

「中間貯蔵施設」は、福島県内において除染に伴い発生した土壌や廃棄物などを最終処分するまでの間、安全に集中的に管理・保管する施設です。保管対象は除染に伴う除去土壌と 10 万 Bq/kg 超の廃棄物であり、前者に放射能濃度の上限・下限は今のところはありません。後者は、主に焼却減容化後の焼却残渣（主灰、飛灰）が想定されます。

規模は施設全体の容量として当初は約 1,500～約 2,800 万 m<sup>3</sup>（東京ドームの約 12～23 倍）と想定されましたが、直近の推計では当初の 3 割減になっています。ただし、追加除染による増加など不確定要因も多く、中間貯蔵対象量についてはさらに精査が必要になります。

施設構成は、以下のとおりです。

##### ① 貯蔵施設

土や廃棄物を貯蔵する。放射線の遮蔽や放射性物質の流出・飛散、地下水汚染防止のための対策が施される。谷地や段丘等の地形を活かしながら大量の除去土壌や 10 万 Bq/kg 超の廃棄物を貯蔵する施設である。土壌は、8,000Bq/kg 以下の低濃度土壌を貯蔵するタイプ I と、それを超える比較的高濃度の土壌を貯蔵するタイプ II に埋設貯蔵される予定である。また、10 万 Bq/kg 超の廃棄物は、適切な収納容器に封入し、遮蔽機能をもつ建屋に貯蔵する予定となっている。

##### ② 受入・分別施設

搬入される土や廃棄物の重量や放射線量の測定、分別を行う。

③減容化施設

除染で発生した草木・汚泥などを焼却・減容化する。

④常時モニタリング施設

空間放射線や地下水のモニタリング（監視）を行う。

⑤研究等施設

貯蔵する土壌や廃棄物の減容化技術、放射性物質の効果的な分離技術の研究等を行う。

⑥情報公開センター

施設の運営についての情報を、住民をはじめ広く発信する。

これまでの国の説明資料<sup>3)・5)</sup>から類推される中間貯蔵施設は、谷地や段丘等の地形を活かしながら大量の除去土壌（非溶出性）や焼却灰（溶出性）を中間貯蔵する施設を整備するイメージです。

これまでの経緯としては、2012年8月に、福島県内の中間貯蔵施設調査候補地として双葉町、大熊町、楡葉町に12箇所が公表されました<sup>6)</sup>。その後、地元との調整等により、現時点では9箇所の調査候補地が選定されています（その後平成26年2月12日に、福島県から、候補地として楡葉町を外し、大熊町と双葉町に集約する提案がなされた）。選定は次のような観点からなされました。

- ① 必要な敷地面積の確保
- ② 土壌や廃棄物が大量に発生する地域からの近さ
- ③ 主要幹線道路へのアクセス
- ④ 断層、軟弱地盤などを避ける
- ⑤ 河川の流れの変更などの最小限化

また、地域住民や施設における労働者の安全対策として、以下の7つのポイントが基本的考え方として示されています。

- ①施設の安全設計
- ②運搬時の安全確保
- ③地震・津波への対応
- ④環境モニタリング
- ⑤安全な操業
- ⑥緊急時対策（災害、事故）
- ⑦地域とのコミュニケーション・情報公開

今後のスケジュールとしては、平成27年1月から一部搬入を開始し、順次貯蔵施設の整備を進めることとしています。また、貯蔵開始後30年以内に福島県外で最終処分を完了するとしています。

### 1.4.3 技術的課題

#### ①種類・性状，放射能のレベルに応じた「器」のカテゴリー分け

除去土壌・廃棄物の種類・性状や放射能のレベルに応じて，受け入れる「器」をどのようにカテゴリー分けし，それぞれの構造基準をどのように設定していくか，という点については、先述のとおり，土壌について8,000Bq/kgをしきい値として2区分(タイプⅠとⅡ)，あと10万超の廃棄物に対する構造が示されました(図1.4a～d参照)7)。

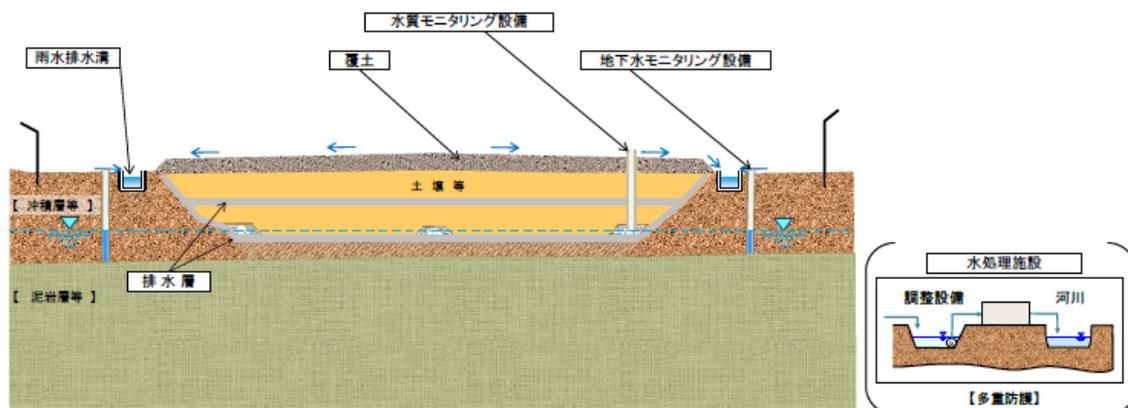


図 1.4-a 除去土壌の貯蔵施設（土壌タイプⅠ）

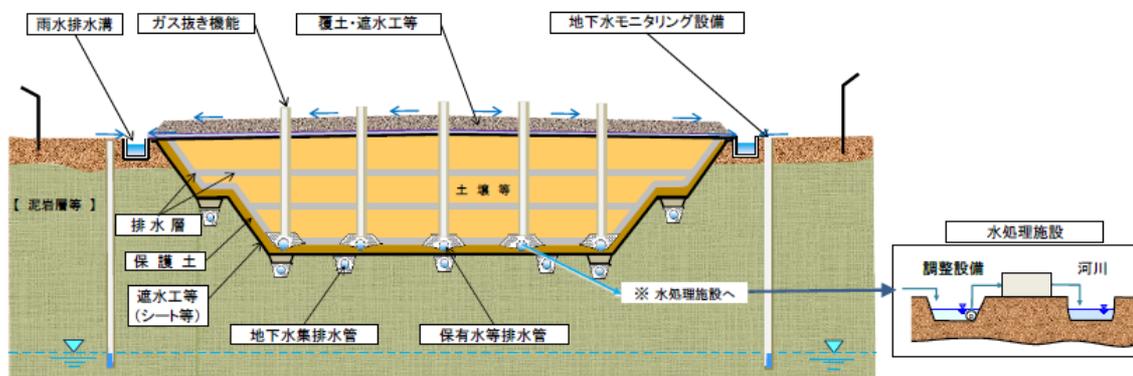


図 1.4-b 除去土壌の貯蔵施設（土壌タイプⅡ a）

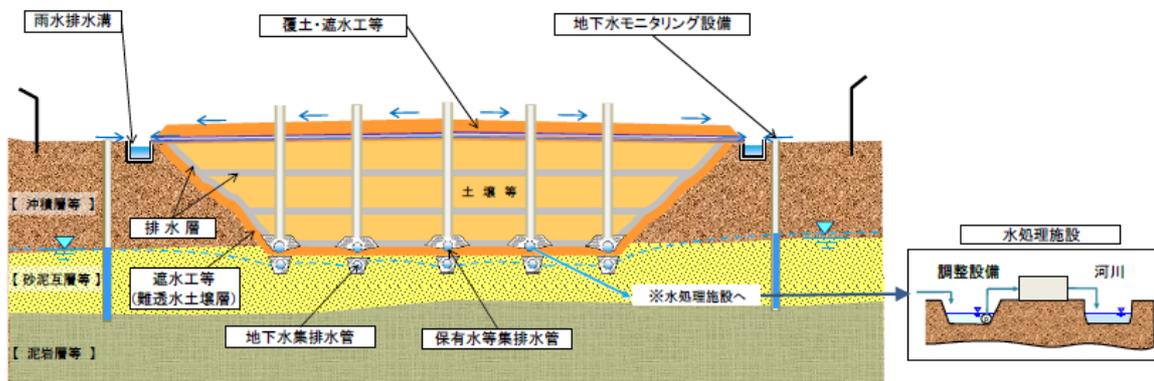


図 1.4-c 除去土壌の貯蔵施設（土壌タイプ II b）

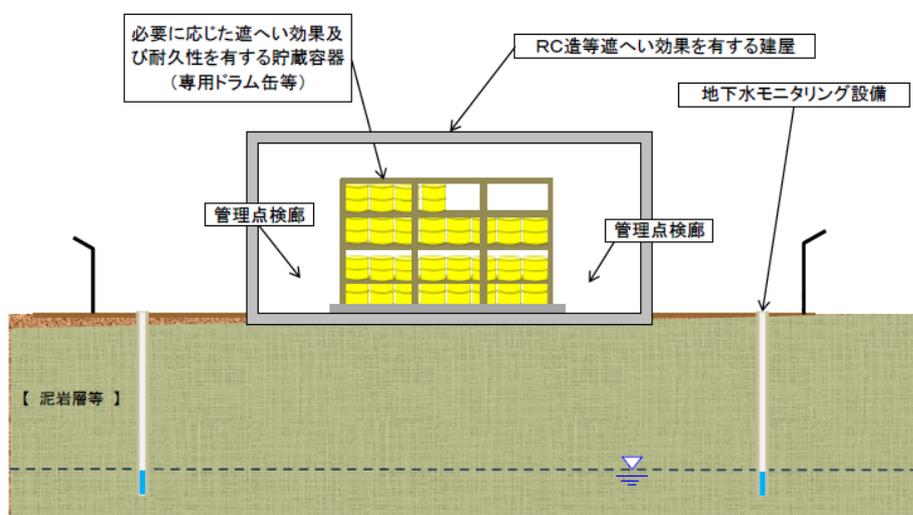


図 1.4-d 10 万 Bq/kg を超える廃棄物の貯蔵施設

8,000Bq/kg 以下の土壌タイプ I は、底部・側部に排水層のみ敷設し、水との接触があっても溶出は生じないことを前提としています。8,000Bq/kg 超の土壌タイプ II はさらに、底部基盤が透水性の低い強固な泥岩層上に遮水シートを敷設する II A タイプと、比較的軟弱な砂泥互層上に变形追随性のある難透水層を敷設する II B タイプに区分されており、立地条件に応じて選択されることとなります。

10 万 Bq/kg 超の廃棄物は、焼却灰など減容化後の残渣などが前提になりますが、溶出性やそれを踏まえた洗浄や固型化等の前処理をどうするか、収納容器等の要件等、県外での最終処分を踏まえた貯蔵の具体的な検討については今後の課題です。

## ②減容化技術

焼却、熔融、焼成などの熱処理や、分級、洗浄、選別などの機械的処理による減容化技術を中間貯蔵に位置づける場合は、二つの機能が考えられます。一つは、中間貯蔵へ搬入する廃棄物等の量を可能な限り減らす事前の減容化であり、もう一つは、最終処分に持ち

込む量を可能な限り減らすための中間貯蔵後に行う減容化です。

除去土壌の減容化技術としては、先述のとおり、分級洗浄技術の適用が可能であると考えられます。得られた低濃度の土壌は、中間貯蔵施設への負荷を減らすために管理された状態で発生地近くまたは中間貯蔵施設内の土工材として利活用する方策などを検討すべきです。そうすることで、県外での最終処分を前提にした中間貯蔵の対象量を極力減らしていく戦略を具体化しなければなりません。一方、中間貯蔵施設に受け入れた除去土壌すべてを熔融や焼成により減容化する方策の選択は、膨大な土壌の量を考えれば現実的ではありません。土壌に強固に吸着された放射性 Cs は、降雨浸透水と接触しても溶出リスクは無視できることから、外部への放射線遮蔽措置を施せば、長期的に安定であるといえます。

除染により生じる草木類、森林除染による腐葉土、落ち葉など、下水汚泥、廃稲わらなどの廃棄物は腐敗性物質であり、仮置きの際に環境保全上様々な問題を生じさせます。それだけに、既存の自治体焼却施設や仮設焼却炉での処理を最優先として、発生源近くでの焼却等による減容化処理を原則とすべきと考えられます。バイオマス発電などエネルギー化の付加価値をつけていくことは、将来の日本の再生可能エネルギー活用や森林保全等の観点からも重要な視点です（但し、残渣の問題には注意が必要）。

今後課題となってくるのは、焼却減容化後に生じる 10 万 Bq/kg 超の焼却残渣（主灰及び飛灰）の処理であると考えられます。減容化は、同時に環境中にばら撒かれた放射性 Cs を分離回収し濃縮するプロセスでもありますが、それでも量自体は、100 万立米を超える焼却残渣の発生が見込まれており、これらをそのまま収納容器に封入し貯蔵するには、施設容量からみて困難になる可能性があります。また、中間貯蔵後の最終処分を考えた場合、セメント固型化等の措置を施すことは、後工程の減容化を困難にする可能性があります。このように考えると、10 万 Bq/kg 超の焼却残渣はさらに減容化技術の適用を検討すべきと考えます。焼却残渣のうち飛灰については、飛灰洗浄技術の適用により容易に放射性 Cs を分離することが可能です。主灰のように難溶解性の形態で存在する場合は、熔融や焼成などの技術により放射性 Cs をばいじん（飛灰）中に分離濃縮し、生成する熔融スラグや焼成物は放射性 Cs の含有濃度が低減されているので限定再生利用を行い、さらに分離濃縮された飛灰（ばいじん）は飛灰洗浄を行うことが考えられます。このようにして、最終処分の対象を減らしていくとともに、飛灰洗浄後の洗浄液中の放射性 Cs は安定した形で濃縮回収・固定化し、最終処分までの期間、厳重に貯蔵保管することを考えていくべきと考えています。

以上の中間貯蔵施設を中核とした今後の処理スキームを図 1.5 に整理したが、一つの試案であり、今後の技術開発によってより合理的な技術システムの提案がなされることも考えられる。また、減容化による高濃度化は、施設の維持管理や解体撤去において、作業者の被ばくや解体廃棄物処理の観点から制約をもたらす可能性もあり、合わせて早急な検討が必要である。

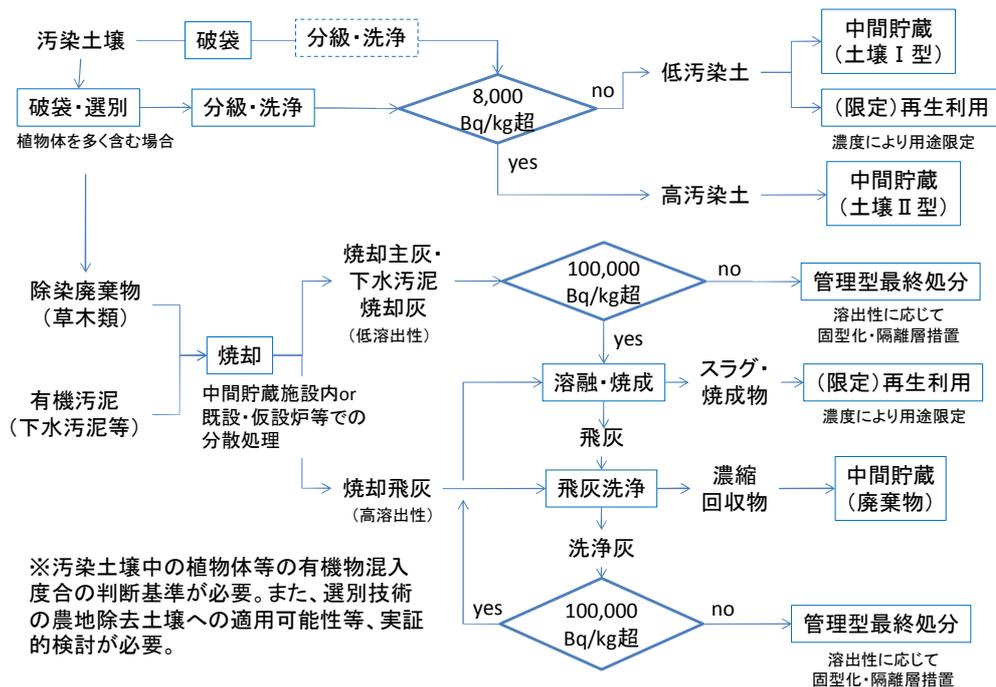


図 1.5 中間貯蔵施設を中核とした処理スキーム試案

### ③前捌き技術

中間貯蔵施設への受入にあたっては、大量の除去土壌等の前捌き技術の重要性についても見逃してはなりません。

埋設貯蔵は、膨大な数のフレキシブルコンテナ（フレコン）に封入されて運ばれてくる土壌等をフレコンから出して、バラの状態での埋設貯蔵することになります。したがって、フレコンを破って土壌を取り出す効率的な破袋技術の確立が必須です。また、植物等の異物を土壌等から選別除去する効率的かつ高精度の技術が確立できれば、貯蔵時の安定性確保や溶出ポテンシャルの低減に効果的です。

### 参考文献

- 1) 平成二十三年三月十一日に発生した東北地方太平洋沖地震に伴う原子力発電所の事故により放出された放射性物質による環境の汚染への対処に関する特別措置法（平成 23 年 8 月 30 日法律第 110 号）、[http://www.env.go.jp/jishin/rmp/attach/law\\_h23-110a.pdf](http://www.env.go.jp/jishin/rmp/attach/law_h23-110a.pdf)
- 2) 平成二十三年三月十一日に発生した東北地方太平洋沖地震に伴う原子力発電所の事故により放出された放射性物質による環境の汚染への対処に関する特別措置法に基づく基本方針（平成 23 年 11 月 11 日閣議決定）  
[http://www.env.go.jp/jishin/rmp/attach/law\\_h23-110\\_basicpolicy.pdf](http://www.env.go.jp/jishin/rmp/attach/law_h23-110_basicpolicy.pdf)
- 3) 「東京電力株式会社福島第一原子力発電所事故に伴う放射性物質による環境汚染の対処において必要な中間貯蔵施設等の基本的考え方について」（平成 23 年 10 月 29 日）  
[http://www.env.go.jp/jishin/rmp/attach/roadmap111029\\_a-0.pdf](http://www.env.go.jp/jishin/rmp/attach/roadmap111029_a-0.pdf)

- 4) 復興庁 HP : 双葉地方町村、福島県と国との意見交換会（平成 24 年 3 月 10 日）配布資料 <http://www.reconstruction.go.jp/topics/000622.html>
- 5) 復興庁 HP : 双葉地方町村と国との意見交換会（平成 24 年 4 月 22 日）配布資料、  
<http://www.reconstruction.go.jp/topics/000755.html>
- 6) 復興庁 HP : 双葉地方及び福島県と国との協議会（平成 24 年 8 月 19 日）配布資料  
<http://www.reconstruction.go.jp/topics/001185.html>
- 7) 環境省 : 中間貯蔵施設安全対策検討会及び環境保全対策検討会の検討結果取りまとめ、平成 25 年 10 月、環境省 HP、[http://josen.env.go.jp/soil/pdf/compiled\\_1310.pdf](http://josen.env.go.jp/soil/pdf/compiled_1310.pdf)

## 2. 放射能に関する基礎知識

### 2.1 放射性物質と単位

放射線と放射能の定義において、放射線は、空間を移動する高速の粒子の流れと一種の電磁波です（以下、電離放射線と呼ぶ）。一方、放射能は、不安定な原子核が崩壊し、①電離放射線を出す能力、及び②その数量（ベクレル）を指し、放射能を持った物質を放射性物質と呼びます。電離とは、イオン化を意味しますが、放射線で生じたイオンは化学的な反応性に富むことから、人体に影響を及ぼす可能性があります。

表 2.1 に主な放射線の種類とその基本的な性質についてまとめました。

表 2.1 主な放射線の種類とその基本的な性質

種類		基本的な性質
$\alpha$ 線	ヘリウム原子核	直進するが、空気中の飛程は数 cm。紙 1 枚で止まる。強い電離作用。体内影響を及ぼす。エネルギー一定。 $\gamma$ 線と共に出ることがある。
$\beta$ 線	電子	アルミ箔や厚さ数 cm のプラスチックで止まる。連続エネルギーをもつ。 $\gamma$ 線と共に出ることがある。核内中性子から電子線が放出され、一般的に $\alpha$ 線の約 100 倍の透過力がある（質量数不変で、 $\beta^+$ 崩壊は陽子+1、 $\beta^-$ 崩壊は陽子が -1 なので、原子番号が 1 つ変わる）。
$\gamma$ 線 X 線	電磁波	光と性質が類似。核内から出て、透過力が大きい。単色エネルギー。 $\alpha$ 線、 $\beta$ 線と共に出る。 $\alpha$ 線の約 1 万倍、 $\beta$ 線の約 100 倍の透過力があるので、鉛やコンクリートなどで遮蔽し、環境中の放射線源に注意。
中性子線	中性子	電子核を構成する素粒子で電氣的に中性である。透過力が強く、水やパラフィンなど軽い元素を含むもので減速させる。単独に存在する中性子の半減期は 10.8 分で $\beta$ 線を放出して陽子に代わる。

福島第一原子力発電所の事故により環境中に飛散した放射性核種は、原子力発電のプロセス（核分裂反応）によって生じた核分裂生成物( $^{137}\text{Cs}$ 、 $^{134}\text{Cs}$ 、 $^{131}\text{I}$ )や、中性子が構造物や燃料に吸収されることによって生成する  $^{60}\text{Co}$  や  $^{241}\text{Am}$  があり、代表的な拡散された核種（核分裂反応による生成率の高い核種）として  $^{137}\text{Cs}$  と  $^{90}\text{Sr}$  を例示します（図 2.1）。

$^{137}\text{Cs}$  は半減期 30.17 年であり、 $^{137}\text{Cs}$  は  $\beta$  線放出核種ですが、 $^{137\text{m}}\text{Ba}$  と永続平衡（放射平衡）の関係にあり、 $^{137\text{m}}\text{Ba}$  からの核異性体転移（IT; エネルギーの異なる核種のうち、測定

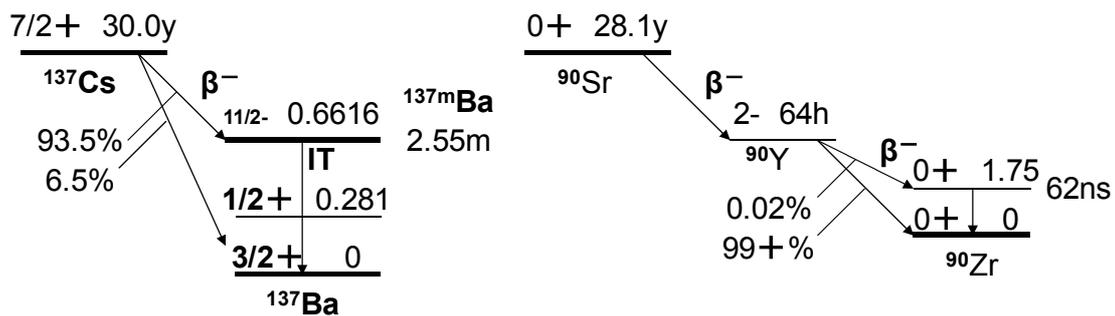


図 2.1  $^{137}\text{Cs}$  と  $^{90}\text{Sr}$  の崩壊図表

可能な半減期を持つ励起された核には m をつけて区別し、励起状態から  $\gamma$  線を放出すること(をいう)による 0.662 MeV の  $\gamma$  線を測定することにより放射能の定量を行います。

$^{90}\text{Sr}$  は最大エネルギーが 0.546 MeV の  $\beta$  線放出核種であり、その半減期は 28.8 年です。娘核種の  $^{90}\text{Y}$  (半減期 64.1 時間、2.28 MeV の  $\beta$  線放出核種) と永続平衡の関係にあり、 $^{90}\text{Y}$  の放射能を測定することにより、 $^{90}\text{Sr}$  の放射能の定量を行います。

次に放射線単位 (ベクレル、吸収線量、線量等量) の基本事項について説明します。

- ① ベクレル (Bq) : 放射能の強さを示し、1 秒間に崩壊する原子の数 (以下、壊変数とよぶ) です。同一核種における単位時間当たりの壊変数は存在する原子核の数に比例します。
- ② 吸収線量 (グレイ ; Gy) : 放射線の照射を受けることによって、物質が受け取るエネルギー。1 kg の物質が 1 J のエネルギーを吸収したとき、その物質の吸収線量は 1 Gy です。
- ③ 線量当量 : 放射線が生体に及ぼす吸収線量の影響を評価する尺度であり、放射線防護の目的に使用される単位です。単位は Sv (シーベルト)。

線量当量 (Sv) = 吸収線量 (Gy)  $\times$  線質係数 (放射線荷重係数)

において、線質係数 (ICRP2007 勧告により放射線荷重係数とよぶ) はそれぞれの放射線の生体に及ぼす影響を表すものであり、 $\beta$  線、 $\gamma$  線、X 線に対しては 1、 $\alpha$  線に対しては 20 が定められます。線量当量のうち、身体のそれぞれの組織や臓器について、不均一に放射線を受ける場合、その組織や臓器の感受性から相対的に値付けられた係数を組織荷重係数とよび、その組織や臓器の「等価線量当量」と呼びます。全ての組織荷重係数の和は 1 であり、全ての組織や臓器の「等価線量当量」を加えたものを「実効線量当量」と呼びます。実際、あらゆるエネルギーの放射線による、実効線量当量を正確に評価するのは難しい為、1 cm 線量当量 (皮膚から 1 cm 深さの線量) を測定することにより外部被ばくによる実効線量を評価します (放射線障害防止法)。 $\gamma$  (X) 線を測定する線量計及びサーベイメーターでは 1cm 線量当量を測定するように調整されています。

- ④ その他 : 表面密度の単位は、放射エネルギーを測定対象の面積で割ったもので表し、(Bq/cm<sup>2</sup>) などの単位で表現します。また、空気中や水溶液中の放射性物質濃度は、放射エネルギーを測

定対象の体積で割ったもので表し、(Bq/cm<sup>3</sup>)などの単位で表現します。食物や土壌試料などは、体積当たりではなく質量当たり、つまり、放射エネルギーを測定対象の質量で割ったもので表し、(Bq/kg)などの単位で表現しています。

## 2.2 放射線健康障害について

放射線が人の健康に与える影響については、被ばくした人に直接現れる影響（身体的影響）と継代的に表れる突然変異等の遺伝的影響の二つに区分できます。

身体的影響については、一時的に大量の放射線を浴びた際に見られる早期効果及び急性障害ともいわれています（嘔吐、下痢、発熱、造血器障害、脱毛、出血等）。少量の線量を長期間浴びた場合や、数年、数十年といった長い潜伏期を経て障害が現れる晩発効果及び晩発性障害ともいわれます（発がん、寿命短縮、白内障等）。全身被ばくしたヒトの急性障害としては、0.5 Gy（γ線とすると線量当量で0.5 Sv）でリンパ球の一時的減少、2～6 Gyの被ばくで白血球の長期的減少や造血機能損傷等が現れます。ヒトの半致死線量当量（30日間での死亡率が50%）は4 Gy（γ線とすると線量当量で4 Sv）と推定されています。一方、低線量をめぐって、100 mSv以上では線量と発がんのリスクには直線的な有意性のある相関が認められるが、100 mSv以下では有意な相関が認められないことも原爆被ばく者の調査で分かっています。

放射線の人体に対する遺伝的影響や身体的影響のうち、晩発障害は線量の大きさによって障害の重篤度ではなく発生率のみが変化します（突然変異出現率、発がん率）。これを確率的影響と呼びます。また、身体的影響のうち、急性効果と、発がん以外の晩発効果は、あるしきい値を超える線量に応じて障害の重篤度が変化します（皮膚紅斑、脱毛、生殖能力への影響、個体死等）。これを確定的影響と呼びます。

遺伝的影響については、放射線による生殖細胞の損傷によって起こり、損傷した遺伝子が正しく修復されない場合、突然変異や染色体の異常の形で現れます。しかしながら、放射線によって遺伝子の突然変異が起こっても、熱や化学薬品による突然変異やその他の劣性遺伝子の継承による自然突然変異と区別することはできないとされています。ただ、放射線は突然変異率を増大させるものであり、遺伝的な損傷のリスクを低減する為にも、医療行為による被ばくを含めて、無用な被ばくを受けない為の厳密な規制が必要です。

身体的影響を及ぼすものとして、外部被ばくと、内部被ばくについて述べます。

自然には、宇宙からの放射線（宇宙線）や、地殻や建材や植物中に含まれる天然放射性物質（主として<sup>40</sup>Kやウラン系列やトリウム系列）による放射線が存在し、医療行為（レントゲン撮影等）による医療放射線、過去の核実験などによる放射線降下物による放射線、各種産業界などで利用される放射線なども存在します。それらの放射線を体外から受けることを外部被ばくと呼び、それらの放射性物質を吸入・摂取行為で体内に取り込むことによって、体内から放射線を受けることを内部被ばくと呼びます。内部被ばくの場合、核種によっては特定の臓器に集まりやすいといった特徴があり、特定臓器や組織への蓄積への

留意が必要です。生体内の放射エネルギーが半分になる期間（以下、実効半減期と呼ぶ）については、放射性物質固有（不変）の物理学的半減期と代謝排泄による生物学的半減期の両方の作用を受けます。

外部被ばくを低減する為には、放射線源自体を直接触れずに取り除くこと、取り除けない場合には放射線源から人の間に放射線を遮るような遮蔽を設けること、放射線源から距離を置くこと、放射線源の近くにいる時間を短くすることが大切です。また、内部被ばくを低減するには、放射性物質を封じ込めること（密封）、放射性物質量を低減すること（除染）、適切な防護具を装着することが大切です。非密封の放射性物質がある場合、呼吸による吸引や付着物や含有物の摂取を避けること、開放している傷口や炎症している箇所からの体内への取り込みを避ける為に露出しないこと、マスク等の防護具を使用し、適宜洗浄し、体内に取り込まないように注意することが大切です。仮に体内に取り込んだ場合は、可能な限り洗浄することや、取り込んだ放射性物質が蓄積しないように代謝・排泄を促進する行為も重要になっています。

### 2.3 放射線の計測技術

表 2.2 に放射線の検出に利用される検出器と相互作用についてまとめました。

**表 2.2 放射線の検出に利用される検出器と利用される相互作用、及び検出可能な放射線種**

検出器	利用される相互作用	検出可能な放射線種
電離箱	気体の電離	$\gamma$ 線
比例計数管	気体の電離	$\alpha$ 線, $\beta$ 線, 中性子線
GM 計数管	気体の電離	$\beta$ 線 + $\gamma$ 線
NaI(Tl)シンチレーション検出器	固体の発光	$\gamma$ 線
ZnS(Ag)シンチレーション検出器	固体の発光	$\alpha$ 線
プラスチックシンチレーション検出器	固体の発光	$\beta$ + $\gamma$ 線
HP-Ge, Ge(Li)検出器	固体の電離	$\gamma$ 線
Si 半導体検出器	固体の電離	$\alpha$ 線
蛍光ガラス線量計	固体の蛍光	$\gamma$ 線
熱蛍光線量計(TLD)	捕獲エネルギーの加熱による発光	$\gamma$ 線, $\beta$ 線, 中性子線用素子の併用
化学線量計(セリウム線量計, 鉄線量計)	化学変化	$\gamma$ 線
電子ポケット線量計(EPD)	固体の電離	$\gamma$ 線, 中性子線

$\alpha$  線の計測には比例計数管、固体（半導体）検出器が用いられます。 $\beta$  線の計測には有機シンチレーション検出器、GM 計数管、比例計数管、電離箱、固体（半導体）検出器が用いられています。 $\gamma$  線、X線の検出には無機シンチレーション検出器、GM 計数管、固体（半

導体) 検出器が使用されます。ここでは、特に $\gamma$ 線測定(主としてCs137及びCs134などによる線量率及び放射能量)に用いられる各種計測機器の概略についてのみ示します。

まず、空間線量(1 cm線量当量)測定用として持ち運びの容易なサーベイメーターでは、電離箱、GM計数管、NaI(Tl)シンチレーション式が一般的です。計測値も $\mu\text{Sv/h}$ 単位で表すことができるNaI(Tl)シンチレーション式は通常、放射線の検出感度が高いがエネルギー依存性が劣るため、カウント(cpm; count per minute; 一分当たりの放射線検出数)測定が基本的に可能ですが、良好なエネルギー依存性を補償する機種も販売されています。

$\gamma$ 線放出核種の定性、定量測定に用いられる検出器としては、まずNaI(Tl)シンチレーションカウンター(NaI(Tl)シンチレーション検出器)が挙げられます。 $\gamma$ 線を受けたNaI(Tl)結晶中で生じた電離や励起が元に戻る過程で生じる蛍光を光電子増倍管において電子に変換しますが、光電子増倍管は波高分析器につながっており、光電子増倍管から生じた信号の数(ピーク数)と振幅(ピーク面積)を測定し、核種同定と放射能測定を行います。

NaI(Tl)シンチレーションカウンターよりもエネルギー分解能に優れ、核種同定に威力を発揮するのがゲルマニウム(Ge)半導体検出器です。円筒形のGe半導体中に $\gamma$ 線が入射するとGe結晶中に生じた電子-正孔対に由来する電離電流が生じ、パルスとしての電気信号が得られます。電子-正孔対を1個作り出すのに必要なエネルギーは、ゲルマニウム半導体検出器でわずか3 eVであり、気体電離を原理とする検出器に比べてはるかに大きなばらつきのない信号が得られます。測定に用いる電子回路はNaI(Tl)シンチレーションカウンターの場合と同様で検出器からの電気信号を増幅器で拡大し、多重波高分析器で解析します。Ge検出器では、検出する $\gamma$ 線のエネルギーが約2 keV異なれば分離可能であり、核種同定と放射能の定量には現在、ほとんどGe半導体検出器が用いられています。

電離箱サーベイメーターによる線量当量率の測定も $\mu\text{Sv/h}$ 単位で表記されます。安定した状態での指示値の精度は良く、サーベイメーターだけでなく、エリアモニタとして長く利用されてきています。シャッターを開けるものについては、外したときの計測値と閉じた状態の差を以って、 $\beta$ 線の線量率測定することも可能です。しかしながら、電源を入れてから数分待たなければならないこと、衝撃に弱いことに注意する必要があります。

GMサーベイメーターについては、 $\mu\text{Sv/h}$ 表示できるもの(線量率測定用)とcpm表示(表面密度測定用)の2種類が存在します。計数は $\gamma$ 線だけでなく $\beta$ 線も検出するので、 $\gamma$ 線の精度のよい測定をする場合には十分に注意する必要があります。一般的に、時定数の設定のあるもので長い時定数の方がより精度の高い測定が可能ですが、計測には時定数の3倍の時間保持(例えば、時定数が10秒となっている場合、30秒間保持しての読み値を測定値とすべきである)として測定すべきとされています。モニタリングポスト、エリアモニタ、個人被ばく測定用の線量計も含めて、上記の放射線による相互作用を利用した検出器が利用されています。

## 2.4 放射線の管理技術

日本における放射線防護に関する技術的基準の考え方は、国際放射線防護委員会（以下、「ICRP」という。）の勧告を尊重して検討されてきます。平成 19 年（2007 年）12 月に、ICRP は、1990 年勧告に代わる 2007 年勧告（Pub.103）を公表しており、放射線審議会では、2007 年勧告の国内制度等への取入れについて基本部会において放射線障害防止の技術的基準の考え方などの検討を行っています。

- ・ 放射線防護の 3 つの基本原則（下記）は 1990 年勧告から引き続き維持されています。
- ・ 正当化の原則（放射線被ばくの状況を変化させるようなあらゆる決定は、害よりも利益が大となるべきである。）
- ・ 防護の最適化の原則（被ばくの生じる可能性、被ばくする人の数及び彼らの個人線量の大きさは、すべての経済的及び社会的要因を考慮に入れながら、合理的に達成できる限り低く保つべきである。）
- ・ 線量限度の適用の原則（患者の医療被ばく以外の、計画被ばく状況における規制された線源のいかなる個人の総線量は、委員会が特定する適切な限度を超えるべきではない。）  
線量限度については、ICRP の調査に基づく科学的知見に基づき、職業被ばくと公衆被ばくの双方について定められており、表 2.3 にそれらの勧告値を示します。

表 2.3 線量限度

	職業被ばく	公衆被ばく
実効線量	100 mSv/5 年 ただし、いかなる 1 年も 50 mSv を超えな い。	1 mSv/年
年等価線量		
目の水晶体	150 mSv	15 mSv
皮膚	500 mSv	50 mSv
手及び足	500 mSv	—

ICRP の定める線量拘束値、参考レベルは、被ばくの種類、個人と社会の被ばく状況等から特徴付け、さらに国、地域の属性を考慮に入れ、国際的な指針等を考慮した最適化プロセスによって 2007 年勧告では下記のように策定されています。

- ・ 1mSv 以下（計画被ばく状況に適用され、被ばくした個人に直接的な利益はないが、社会にとって利益があるかもしれない状況（例：計画被ばく状況の公衆被ばく））
- ・ 1～20 mSv 以下（個人が直接、利益を受ける状況に適用（例：計画被ばく状況の職業被ばく、異常に高い自然バックグラウンド放射線及び事故後の復旧段階の被ばくを含む））
- ・ 20 mSv～100 mSv 以下（被ばく低減に係る対策が崩壊している状況に適用（例：緊急事

態における被ばく低減のための対策))

国内の事業所における労働者の電離放射線被ばくを防止するために労働安全衛生法に基づく「電離放射線障害防止規則」(厚生労働省省令)が定められています。事業者は法を遵守し、確実に労働者の安全を守る義務を有しています。規則の要点を以下に列記します。

- ・ 放射線の定義と放射性物質の核種、数量と濃度による定義が決められています。
- ・ 管理区域を標識により明示することが定められています(1.3 mSv/3月或いは表面密度4 Bq/cm<sup>2</sup>を超えるおそれのあるとき)。
- ・ 施設等の線量を限度以下に保つこと(1 mSv/週)。
- ・ 放射線業務従事者の被ばく限度(100 mSv/5年+50 mSv/年+(女性)5 mSv/3月、水晶体:150 mSv/年、皮膚:500 mSv/年)
- ・ 放射線業務従事者の線量の測定(外部被ばく測定:放射線測定器の装着、内部被ばく測定:1回/3月(但し、吸入摂取した時は速やかに))
- ・ 線量の測定結果の記録(3月ごと、1年ごと、5年ごとの合計を記録します。30年間保管(放射線影響協会へは5年後に引き渡し可能)、放射線事業従事者へ通知)
- ・ 専用の作業室内での作業(非密封な放射性物質取扱作業は専用の作業室内にて作業を行う。作業室の構造は腐食しにくい材質、表面平滑、突起・くぼみがないこと)
- ・ 空気中の放射性物質濃度、飛来防止措置、専用時具(厚生労働大臣が定める濃度の1/10、飛来物による汚染がないように幕・壁の設置、専用用具の利用)
- ・ 汚染検査(作業室内の汚染検査(1回/月)と除染、作業室から退去するときの汚染検査と除染)
- ・ 貯蔵施設(外部と区画された施設、施錠、貯蔵標識)
- ・ 焼却炉(気体が漏れない・灰が飛散しない構造、焼却炉標識)
- ・ 保管廃棄施設(外部と区画された施設、施錠、保管廃棄標識)
- ・ 保護具、作業衣(放射性物質濃度に応じた保護具着用、専用の作業衣)
- ・ 作業環境測定(作業室の放射線量率:1回/月測定、5年間保存、作業室の放射性物質濃度:1回/月測定、5年間保存)
- ・ 健康診断(管理区域常時立ち入り者:指定時、1回/6月、健康診断の記録:30年間保存(5年後に専門機関へ移転可能)、作業員へ健康診断結果の通知、健康診断結果の報告:所轄労働基準監督署長あて)

## 参考文献

石川友清, 初級放射線, 通商産業研究社(1993年)

動力炉・核燃料技術開発事業団, 放射線業務従事者指定教育講座テキスト(1993年)

核原料物質、核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律(「原子炉等規制法」)

放射性同位元素等による放射線障害の防止に関する法律(「放射線障害防止法」)

労働安全衛生規則

電離放射線障害防止規則(「電離則」)

作業環境測定法

### 3. 放射性物質（セシウム、ストロンチウム）の物性

放射性物質を含む廃棄物の処理・処分において、放射性セシウムやストロンチウムがガスとして大気へ拡散するのか、固体となり灰に付着するのか、さらに雨水と接触して浸出水中へ溶け出すのか、といった挙動が安全性の確保の観点から最も重要になります。それらの挙動を理解もしくは予測するには、それらの蒸気圧や水への溶解度などの物理化学的性状（以下、物性）が必要となります。しかしながら、Cs-134 および-137、Sr-90 そのものの物性情報は入手できません。そこで、安定同位体のデータを収集し、物性について紹介します。ただし、それらの元素は表 3.1 の周期律表ではそれぞれアルカリ金属（第 1 もしくは 1A 族）とアルカリ土類金属（第 2 もしくは 2A 族）に属するため、環境または処理において原子よりはむしろ電解質（塩）として存在する可能性が高いと予想されます。そこで、それらの元素から構成される CsI や CsCl 等の塩や同族列の元素（Na や Ca 等）とその塩についても併せて紹介します。

1	2											13	14	15	16	17	18																																															
1A	2A											3A	4A	5A	6A	7A	8A																																															
1	H	2	He																																																													
2	Li	Be	3	B	4	C	5	N	6	O	7	F	8	Ne																																																		
3	Na	Mg	3B	4B	5B	6B	7B	8B	9B	10B	11B	12B	13	Al	14	Si	15	P	16	S	17	Cl	18	Ar																																								
4	19	K	20	Ca	21	Sc	22	Ti	23	V	24	Cr	25	Mn	26	Fe	27	Co	28	Ni	29	Cu	30	Zn	31	Ga	32	Ge	33	As	34	Se	35	Br	36	Kr																												
5	37	Rb	38	Sr	39	Y	40	Zr	41	Nb	42	Mo	43	Tc	44	Ru	45	Rh	46	Pd	47	Ag	48	Cd	49	In	50	Sn	51	Sb	52	Te	53	I	54	Xe																												
6	55	Cs	56	Ba	57	La	58	Ce	59	Pr	60	Nd	61	Pm	62	Sm	63	Eu	64	Gd	65	Tb	66	Dy	67	Ho	68	Er	69	Tm	70	Yb	71	Lu	72	Hf	73	Ta	74	W	75	Re	76	Os	77	Ir	78	Pt	79	Au	80	Hg	81	Tl	82	Pb	83	Bi	84	Po	85	At	86	Rn
7	87	Fr	88	Ra	89	Ac	90	Th	91	Pa	92	U	93	Np	94	Pu	95	Am	96	Cm	97	Bk	98	Cf	99	Es	100	Fm	101	Md	102	No	103	Lr	104	Rf	105	Db	106	Sg	107	Bh	108	Hs	109	Mt	110	Ds	111	Rg	112	Uub	113	Uuq	114	Uuh	115	Uuq	116	Uuh	117	Uuq	118	Uuo

表 3.1 元素周期律表

物性データとして、融点 ( $T_f$ )、沸点 ( $T_b$ )、蒸気圧 ( $P_{vp}$ )、イオン化エネルギー (IE)、電子親和力 (EA)、水への溶解度 ( $S_w$ ) を収集しました。 $T_f$ 、 $T_b$ 、 $P_{vp}$  については Yaw の Chemical Properties Handbook<sup>1)</sup> から、IE と EA については NIST の Web ページから、 $S_w$  については Linke の Solubilities : Inorganic and Metal-organic Compounds; A Compilation of Solubility Data from the Periodical Literature<sup>2)</sup> からデータを引用しています。ただし、Cs 塩の焼却プロセス内の挙動解析では、より低温域の蒸気圧データが重要になりますので、Cs 塩については、Scheer と Fine の文献<sup>3)</sup> から低温域の蒸気圧データを引用しています。また、物性データに加えて、蒸気圧

データから大気へ揮発する可能性を、IE と EA から環境へ放出された場合のイオン化の可能性を、さらに、水への溶解度をから水系への溶解性を考察します。

表 3.2 に元素および塩の純物質の  $T_f$  および  $T_b$  を、図 3.1 には蒸気圧データを示します。Cs 原子そのものは、Li (リチウム)、K (カリウム)、Na (ナトリウム) 等のアルカリ金属に属し、Na のように  $T_f$  や  $T_b$  は低く、蒸気圧は高い傾向にあります。したがって、高温でなくても揮発する可能性が高いといえます。しかし、Cs はハロゲン (F、Cl、Br、I) 化すると  $T_f$  と  $T_b$  は 500~600°C 高くなります。ただし、高温下における蒸気圧は比較的高いため、ハロゲン化塩として存在する場合は、高温下における揮発も注意が必要です。また、Cs はアルカリ金属の中で最も高い蒸気圧を有している点も注意すべき点です。

Sr は Mg (マグネシウム) や Ca (カルシウム) 等のアルカリ土類金属に属し、アルカリ金属に比べて  $T_b$  と  $T_f$  の値は 700°C 程度高いものの、蒸気圧曲線から高温下では大気中へ揮発する可能性があると考えられます。しかし、Cs と同様に、 $\text{SrCl}_2$  等のハロゲン化塩となると、 $T_b$  と  $T_f$  がさらに高くなるため、大気へ揮発する可能性は低いと予想されます。

**表 3.2a 元素に対する物性 ( $T_b$ ,  $T_f$ , IE, EA, 水に対するヘンリー一定数 ( $k_H^\circ$ ))**

	Na	K	Cs	Mg	Ca	Sr
原子量 g/mol	22.99		132.905		40.078	87.62
沸点( $T_b$ )/K	1156		963.15		1762	1630
融点( $T_f$ )/K	370.98		301.15		1112	1042
IE/eV	5.13908		3.8939		6.11316	5.69484
EA/eV	0.547949		0.47163		0.024546	0.052038
$k_H^\circ$ / mol/kg*bar	-		-		-	-

**表 3.2b 塩に対する沸点 ( $T_b$ ) と融点 ( $T_f$ )**

	Na	NaCl	NaI	Cs	CsCl	CsI
原子量 or 分子量 g/mol	22.99	58.442	149.894	132.905	168.358	259.81
$T_b$ / K	1156	1738.15	1577.15	963.15	1573.15	1553.15
$T_f$ / K	370.98	1073.95	924	301.15	919.15	894.15
	Ca	Mg	MgCl <sub>2</sub>	Sr		
原子量 or 分子量 g/mol	40.078	24.305	95.21	87.62		
$T_b$ / K	1762	1376	1691.15	1630		
$T_f$ / K	1112	922	985.15	1042		

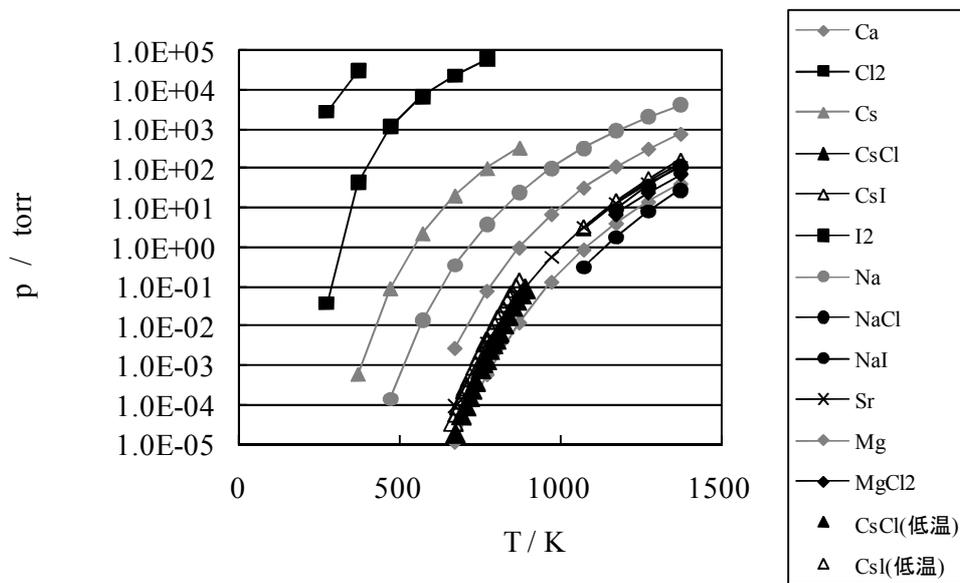


図 3.1  $I_2$ , Cs, Sr およびそれらの塩類の蒸気圧  
低温域のデータは文献 3、それ以外は文献 1

以上の蒸気圧特性により、CsCl については、焼却炉のような高温下ではガス態として揮発する可能性があります。では、焼却炉の後のバグフィルターや煙道、つまり、冷却された低温下においてガス態としてどの程度揮発する可能性があるのでしょうか。蒸気圧、つまり、ガス態が飽和する濃度の観点から推測してみます。焼却炉内の温度における CsCl の蒸気圧データはありますが、バグフィルター周辺の温度 (150~170°C) に対して CsCl の蒸気圧データは残念ながら入手できません。

そこで、Clausius-Clapeyron 式を用いて 150~170°C の蒸気圧を推算してみます。Clausius-Clapeyron 式を次式に示します。

$$\ln P_{vp} = A - \frac{B}{T} \quad (3.1)$$

ここで、A と B は定数になります。それらの値は蒸気圧データから決めることができます。3.1 式は、純物質の気液または気固平衡から導出される下記の関係を積分することによって得られた式です。

$$\frac{dP_{vp}}{dT} = \frac{\Delta_v H}{T \Delta_v V} \quad (3.2)$$

ここで、 $\Delta_v H$  蒸発エンタルピーで、昇華の場合には、昇華エンタルピー ( $\Delta_{sub} H$ ) になります。エンタルピーが温度によらず一定、さらに、体積の変化量  $\Delta_v V$  は、次式のように気体の体積と仮定しています。また、理想気体の状態方程式 ( $PV=nRT$ ) を用いて、 $RT/P$  として表すこともできます。

$$\Delta_v V = V_g - V_s \cong V_g = \frac{RT}{P} \quad (3.3)$$

3.1 と 3.2 式より、傾き B と  $\Delta_v H$  もしくは  $\Delta_{\text{sub}} H$  は次式の関係になり、B から  $\Delta_{\text{sub}} H$  を求めることができます。

$$\Delta_{\text{sub}} H = B \times R \quad (3.4)$$

Scheer と Fine の文献<sup>3)</sup>では、蒸気圧データを 3.1 式で相関しているため、その値を用いて、150 から 170°Cまで外挿しました。その結果を図 3.2 および表 3.3 に示します。CsCl の蒸気圧は、150°Cで  $2.75 \times 10^{-12}$  Pa、170°Cで  $3.37 \times 10^{-11}$  Pa となり、バグフィルター付近の温度域では、蒸気圧が極めて低いと予想されます。ただし、この計算では、200°C以上の低温域へ外挿していることから、実際の蒸気圧はそれよりも低い値になると考えられます。これは、 $\Delta_{\text{sub}} H$  は次式のように弱い温度依存性があり、温度が低いほどエンタルピーが高い、すなわち、温度低下により蒸気圧が低くなる度合いが大きくなるためです。

$$\Delta_{\text{sub}} H_{170^\circ\text{C}} = \Delta_{\text{sub}} H_{\text{fus}} + \int_{170}^{\text{fus}} (Cp_s - Cp_g) dT \quad (3.5)$$

ここで、 $Cp_s$  と  $Cp_g$  はそれぞれ固体および気体の熱容量、下添字 fus は融点を示しています。参考までに、800K (527°C) の文献値と 3.5 式で計算した 150°Cおよび 170°Cの昇華エンタルピーの値を表 3.3 に示します。温度が約 350°C低くなると、 $\Delta_{\text{sub}} H$  は約 2.5%高くなることがわかりました。

次に、一般ごみの焼却において微量な有害物質の代表格であるダイオキシン類（最も毒性の高い2,3,7,8-テトラクロロジベンゾジオキシン (T4CDD) および最も蒸気圧の低いオクタジベンゾジオキシン (O8CDD)) と比較しました。

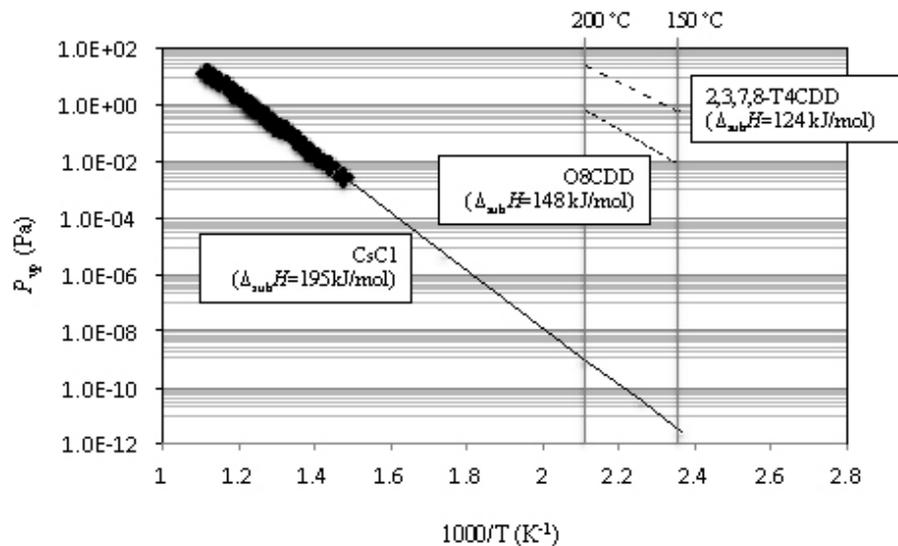


図 3.2 Clausius-Clapeyron 式を用いた CsCl の蒸気圧 ( $P_v$ ) とダイオキシン類との比較 ( $\Delta_{\text{sub}} H$  は直線の傾きと比例関係、 $\Delta_{\text{sub}} H$  の大きさ : CsCl > O8CDD > 2, 3, 7, 8-T4CDD)

表 3.3 塩化セシウム (CsCl) とダイオキシン類の蒸気圧および放射性 Cs の濃度

温度 (°C)	2,3,7,8-T4CDD の蒸気圧 <sup>4)</sup> (Pa)	O8CDD の蒸気圧 <sup>4)</sup> (Pa)	式 3.1 による CsCl の蒸気圧 (Pa)	昇華エンタルピー $\Delta_{sub}H$ (kJ/mole)
150	0.522	$7.15 \times 10^{-3}$	$2.75 \times 10^{-12}$	201
170	2.560	$4.79 \times 10^{-2}$	$3.37 \times 10^{-11}$	200
527	-	-	0.620	195

CsCl の蒸気圧は、一般的に揮発性の低いダイオキシン類と比較しても 9~11 桁ほど低く、超低揮発性もしくは不揮発性といえるくらいのレベルと考えられます。この超低揮発性、つまり、気相へ分配する能力が極めて低いことが焼却施設の排ガス調査においてバグフィルターの出入り口でガス態の放射性 Cs が検出されない理由と考えられます。また、CsCl の蒸気圧はダイオキシン類に比べても温度の影響を大きく受けますが、これは冷えることによって CsCl のガス濃度が過飽和になる度合いが大きくなり、温度低下により固体へ凝縮しやすいことも示唆しています。すなわち、ダイオキシン対策で排ガスを急冷することは、CsCl ガスを固体化させるのに有効に働いていると推察されます。

図 3.3 に Cs と Sr はイオン化エネルギーを他の元素と比較してみます。アルカリ金属およびアルカリ土類金属の値は低く、陽イオンになり易いとえます。特に、Cs のイオン化エネルギーの値は最も低いため、Cs の反応性は非常に高く、一度大気へ放出されれば容易に酸化されると考えられます<sup>5)</sup>。したがって、環境中では、酸素、水、他の元素や化学物質と反応し、酸化物、塩化物、炭酸塩、硝酸塩などの塩類もしくはイオンとして存在するのではないかと推察されます。

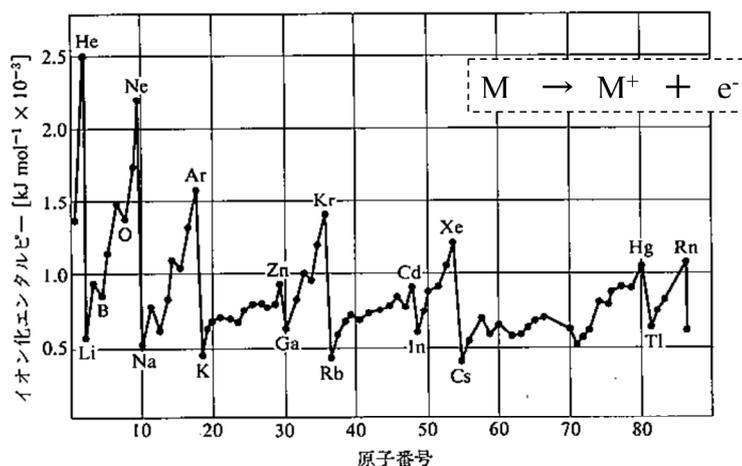


図3.3 第一イオン化エンタルピー  $\Delta H_{ion}$  の原子番号による変化<sup>5)</sup>

Cs および Sr の塩類の水への溶解度を表 3.3 に示します。CsCl などの Cs の塩類は溶解度が非常に高く、浸出水などの水環境系へ  $\text{Cs}^+$  イオンとして溶解する可能性が極めて高いと予想されます。また、Sr も F 以外のハロゲン化塩についてはやはり溶解度が高く、水環境系へ  $\text{Sr}^{2+}$  イオンとして溶解しているといえます。しかし、炭酸塩 ( $\text{SrCO}_3$ )、硫酸塩 ( $\text{SrSO}_4$ )、フッ化物 ( $\text{SrF}_2$ ) の場合は溶解度が桁違いに低くなり、水環境系への溶解性は低くなります。

表 3.3 にて水への溶解度のデータを示しましたが、放射性同位体の環境濃度は、例えば、Cs-137 の 10Bq/L は、つまり、 $2.3 \times 10^{-14} \text{ mol/L}$  と極めて微量であることから、大気から水系に降下した元素およびその塩類は、すべてイオン化して溶解するものと考えられます。ただし、イオン化した Cs は土壌等の他の媒体へ吸着することもあります。吸着力は吸着媒体に依存するので、吸着力が強い場合には水環境中へ溶出する量がかなり少なくなると予想されます。5 章には土壌等への吸着に関する説明があります。

表 3.3 水へ溶解度

元素	塩	単位	温度 / °C	溶解度
Cs				
	CsBr	g/飽和溶液 100g	25	55.23
	CsIBr <sub>2</sub>	g/飽和溶液 100g	15	4.45
	CsCl	g/溶媒 100g	25	65.55
	CsI	g/飽和溶液 100g	25	46.1
	Cs <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	kg/g*	20*	11.1*
	CsHCO <sub>3</sub>	g/溶媒 100g	20	67.8
	Cs <sub>2</sub> O	g/飽和溶液 100g	30	70.63

元素	塩	単位	温度 / °C	溶解度
Sr				
	SrBr <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O	g/溶媒 100g	25	107
	SrCl <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O	g/溶媒 100g	25	55.8
	SrI <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O	g/溶媒 100g	20	177.8
	Sr(OH) <sub>2</sub> ·8H <sub>2</sub> O	g/飽和溶液 100g	25	0.85
	Sr(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	g/溶媒 100g	26.40	82.052
	SrSO <sub>4</sub>	g/飽和溶液 100g	20	0.0132
	SrCO <sub>3</sub>	mol/溶媒 1kg	25	5.53E-05
	SrF <sub>2</sub>	mol/L	25	0.00091

\*：溶媒は水ではなくエタノール

## 参考文献

- 1) Yaw CL. Chemical Properties Handbook: Physical Thermodynamic, Environmental, Transport, Safety, and Health Related Properties for Organic and Inorganic Chemicals, McGraw-Hill NY 1999.
- 2) Linke WF. Solubilities: Inorganic and Metal-Organic Compounds; A Compilation of Solubility Data from the Periodical Literature, 4th ed.; American Chemical Society: Washington, DC, 1965.
- 3) Scheer MD, Fine J. (1962) Entropies, Heats of Sublimation, and Dissociation Energies of the Cesium Halides, J. Chem. Phys., 36(6), 1647-1653.
- 4) Mackay D, Shiu WY, Ma KC. Handbook of Physical-Chemical Properties and Environmental Fate for Organic Chemicals, CRC Press Taylor&Francis, Boca Raton, FL, 2006.
- 5) コットンら (中原訳), 基礎無機化学 第二版, 培風館, 1991.