放射性セシウムで汚染した木質チップの再利用に係わる線量評価

高井 静霞^{*1}, 関 優哉^{*1}, 木村 英雄^{*1}, 武田 聖司^{*1}

(2014 年 7 月 14 日受理)

(2014 年 12 月 11 日再受理)

Dose Estimation for the Reuse of Wooden Chips Contaminated by Radioactive Cesium

Shizuka TAKAI,^{*1} Masaya SEKI,^{*1} Hideo KIMURA^{*1} and Seiji TAKEDA^{*1}

Wood and wooden wastes potentially contaminated by radioactive cesium released by Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant have been reused for various purposes as wooden chips. The Ministry of the Environment indicated that the general disaster wastes including the wooden wastes were reusable with the criteria of total radioactive cesium (cesium-134 and cesium-137) concentration of 100 Bq/kg. The criteria were determined, based on the existing clearance level of concrete and metal generated at nuclear power plant and not on dose estimation for reuse of wooden chips. The purpose of this study is to confirm the validity of the criteria by the dose estimation approach. We investigated actual conditions of production and use for main five reuse purposes of wooden chips around Fukushima. On the basis of this investigation, exposure pathways and parameters for workers and public involved with the reuse of wooden chips were selected. We calculated dose for the exposure pathways and evaluated radioactive concentrations of wooden chips corresponding to dose criteria for safety reuse of radioactive materials. From the calculation result, all radioactive concentrations corresponding to the dose criteria are more than the reuse criteria of 100 Bq/kg, which ensures the validity of the criteria for the safety of present reuse of wood and wooden wastes.

KEY WORDS: dose estimate, wooden chips, radioactive cesium, reuse of wooden wastes, Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant.

I 緒 論

福島第一原子力発電所事故に伴い大気中に放出された放射性セシウム (Cs-134, Cs-137) によって、福島県外を含む広範囲の周辺環境が汚染された。そのような環境中にある汚染物 (震災による災害廃棄物を含む) は、その量が膨大であるため、物量低減及び資源の有効活用のために再利用が望まれてきた。

放射性核種で汚染された物質の再利用は、それを再利用することで受ける被ばく線量が自然界の放射線レベル

に比較して十分小さく、人の健康への影響に対して無視できる程度であれば、可能であると考えられる。原子炉施設等ではこの考え方にに基づき、施設の解体等により発生する金属やコンクリートを対象として、それらの再利用に特有な被ばく経路やパラメータを想定した詳細な線量評価を行うことにより、放射性セシウム (Cs-134 及び Cs-137) に対するクリアランスレベル (放射性物質として扱う必要がない物質中の濃度) を 100 Bq/kg と設定している (以下「既往のクリアランスレベル評価」)^{1,2)}。

この原子炉施設等におけるクリアランスレベルに基づき、環境省では東日本大震災により発生した災害廃棄物全般に対する再利用可能な放射性セシウムの濃度を 100 Bq/kg と設定しているが、この対象となる災害廃棄物には既往のクリアランスレベル評価で対象としている金属やコンクリート以外の木質系災害廃棄物も含まれている³⁾。また木質系災害廃棄物だけでなく一般的な木く

^{*1} (独) 日本原子力研究開発機構安全研究センター環境影響評価研究グループ; 茨城県那珂郡東海村白方白根 2-4 (〒319-1115)
Environmental Safety Research Group, Nuclear Safety Research Center, Japan Atomic Energy Agency; 2-4 Shirakata-Shirane, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki 319-1115, Japan.
E-mail: takai.shizuka@jaea.go.jp

ずに対しても、木くずを扱う業界団体が災害廃棄物全般に対する再利用の基準 100 Bq/kg を受け入れの自主基準として運用している⁴⁾。一般に木くずは、間伐材等の木材や建設発生木材等の木質系廃棄物に分類できる。このような木材や木質系廃棄物は、主に粉碎機によりチップ化することで木質チップとして再生資材化され、さまざまな用途に再利用されている。

しかし上述したように、100 Bq/kg という基準値は、原子炉施設等で発生した金属やコンクリートに固有な被ばく経路やパラメータを設定した線量評価に基づくものであるため、福島事故によって汚染された木質系廃棄物の再利用に対する安全性を保証するものではない。たとえばクリアランスレベルの評価では、原子炉施設等における解体廃棄物中の汚染されていない廃棄物の混合割合の推定結果から、再利用される廃棄物全体に対する汚染された廃棄物の割合を 0.1 と設定しているが、福島事故により汚染された廃棄物の再利用時の非汚染物質との混合割合は、再利用される場所や用途によって大きく異なると考えられる。一方、汚染された木質系廃棄物の再利用に対する線量評価は現在までに行われていなかった。

そこで本研究では、木材及び木質系廃棄物の再利用に対する評価を行うことを目的として、木質チップの主要な再利用用途に対し、各用途における運搬から製品化までの一連の作業工程と公衆の最終的な製品の利用実態を調査し、その調査結果をもとに各用途における作業員及び公衆の評価すべき被ばく経路を設定した。さらに、こうした実態調査の情報等により決定した評価パラメータの条件のもと、各被ばく経路による線量を算出し、上記の濃度基準値に基づき運用されている木質チップの再利用に対する安全性について検討した。

II 評価方法

1. 評価経路

木質チップの再利用用途は、元となる木材及び木質系廃棄物の発生形態によって異なり、その発生形態は大きく「建設発生木材」、「工場残材」、「間伐材」、及び、「木質系災害廃棄物」の四つに分類できる⁵⁾。「建設発生木材」の主な再利用用途は、パーティクルボード、製紙、堆肥、バイオマス発電、マルチング材、敷料である⁶⁾。「工場残材」は、大部分が工場内におけるボイラー等の燃料や製紙等の原料として再利用されている⁵⁾。「間伐材」は現在利用率が低いものの、バイオマス発電の燃料としての再利用が期待されている⁵⁾。「木質系災害廃棄物」は、

ボード等の材料及びバイオマス発電の燃料として再利用されている⁵⁾。

以上のことから、汚染された可能性のある木質チップの主な再利用用途は、パーティクルボード、製紙、堆肥、バイオマス発電、マルチング材、敷料の 6 種類であると考えられる。これらのうち敷料として使用される木質チップは、畜舎の床に敷かれ使用した後、発酵させて堆肥となる。一方、堆肥として使用される木質チップは、発酵場に敷き詰められた後、発酵させて堆肥となる。そのため、汚染された木質チップを堆肥と敷料に使用した場合で、作業員や公衆の被ばく経路は同様のものであると考えられる。また、敷料と堆肥はともに原材料のうち木質チップが占める割合が施設または製品により大きく異なるが、福島県近隣における一戸あたりの年間敷料使用量は、一戸あたりの飼育頭数及び 1 頭あたりの年間敷料使用量⁷⁾から多くても百トン程度であると見積もられる一方、福島県近隣における最大規模の堆肥製造施設での年間堆肥生産量は千トン程度である⁸⁾。よって、福島県近隣では一施設あたりの木質チップ使用量は堆肥製造施設の方が多いと考えられるので、ここでは敷料を評価対象から除外し、堆肥について評価を行う。また、パーティクルボード及び製紙施設では、施設内で発生した木くず等を燃料とした自家バイオマス発電が行われるが、本評価ではこれらをまとめてバイオマス発電として評価を行うことにする。

以上より、本研究ではパーティクルボード、製紙、堆肥、バイオマス発電、マルチング材の 5 種類の再利用用途に対して評価を行う。汚染された木質チップをこれらの再利用用途に使用した場合、作業員及び公衆は再利用される製品の製造や再利用された製品の利用などに伴う、各用途に特有なさまざまなプロセスにより被ばくする可能性がある (Fig. 1)。本評価では、これらの各再利用用途に対して想定しうるすべてのプロセスについて、被ばく (外部被ばく及び内部 (吸入または摂取) 被ばく) の評価経路を網羅的に設定した。以下に各再利用用途に対する評価経路について示す。

(1) パーティクルボード

パーティクルボードは、木質チップを熱圧成型したボードである。汚染した木質チップをパーティクルボードに再利用した場合、パーティクルボードの製造に伴って作業員及び公衆が被ばくする可能性がある。

パーティクルボードの製造工程は大きく分けて、

①木質チップの製造施設への輸送・積み下ろし

Fig. 1 Description of process that worker and public are possibly exposed by recycling of wooden chips.

- ②ストックヤードまたはサイロでの木質チップの保管
- ③パーティクルボードの製造（洗浄及び乾燥，接着剤との混合，ローラープレスによるボードへの圧縮，規格に応じた切断加工）

④製品化されたパーティクルボードの倉庫内保管の四つである⁹⁾。このうち，③パーティクルボードの製造は全工程が機械化されているため，作業者が線源である木質チップやパーティクルボードに接する時間が他の作業に比べ短い。よって，パーティクルボードの製造に伴う作業者の被ばくは，③パーティクルボードの製造以外のすべての作業に係わる作業者を評価対象とする。またパーティクルボード製造施設内において，大量の汚染された木質チップ，及び，それらから作られたパーティクルボードを運搬・保管することで，運搬経路及び施設周辺の居住者が被ばくする可能性がある。よって，パーティクルボードの製造に伴う公衆の被ばくは，木質チップ運搬経路と製造施設周辺居住者を評価対象とする。

製品化されたパーティクルボードは，主に住宅（壁材等）や家具の材料として利用される¹⁰⁾。汚染された木質チップから作られたパーティクルボードをこれらの用途に利用することで，住宅の建築，家具製造，完成した住居への居住，家具の利用の各段階において，作業及び公衆が被ばくする可能性がある。住宅建築や家具製造に伴う作業及び公衆の外部被ばくは，住宅居住者や家具

使用者に比べ被ばく時間が短く線源との距離が長いと考えられるため評価対象から除外し，汚染したパーティクルボードを使用した住宅の居住者及び家具の使用者の外部被ばくを評価対象とする。ここで家具の使用者の外部被ばくは，使用者と家具との距離がもっとも近いと考えられるベッドからの被ばくを評価する。また，住宅建築及び家具製造では作業時に発生する粉塵により内部被ばくをもたす可能性があるが，作業時間及び線源であるパーティクルボードと作業者の距離は住宅建築と家具製造で同程度であり，一般に家具製造に比べ住居建築を行う現場の方が公衆との距離が近いと想定される。よって，家具製造に伴う被ばくは評価対象から除外し，住居建築作業及び住居建築現場周辺居住者の内部被ばくを評価する。Table 1 に，パーティクルボードへの再利用に対する評価経路を示す。

(2) 製紙

製紙は，木質チップや古紙を原料に作られたパルプを，薄いシート状に成形することで行われる。製紙の工程は大きく分けて，

- ①木質チップの製造施設への輸送・積み下ろし
- ②ストックヤードでの木質チップの保管
- ③木質チップのパルプ化（化学薬品によるパルプの分離（化学パルプ））

Table 1 Description of exposure pathways for particle board.

No.	Description	Radioactive source	Exposed individual	Category of exposure
101	Transportation	wooden chips	Worker	External
102	Residence near the transportation pass		Public (child)	External
103–105	unloading		Worker	External, Inhalation, Ingestion
106–108	Work in a yard storing wooden chips			External, Inhalation, Ingestion
109	Work around a silo storing wooden chips			External
110	Work in a warehouse of particle board	Particle board		External
111	Residence near the particle board factory	A wooden chip yard	Public (child)	External
112		A wooden chip silo		
113		A warehouse of particle board		
114–115	Construction of a house	Particle board	Worker	Inhalation, Ingestion
116–117	Residence near the construction site		Public (adult, child)	Inhalation
118–119	Residence in the house		Public (adult, child)	External
120–121	Use of bed		Public (adult, child)	

④パルプから紙への加工(古紙由来のパルプとの混合、ワイヤー上でのパルプのシート化、プレスロールによる脱水、乾燥、表面加工、規格に応じた切断加工)
⑤ロール状に成形した紙の倉庫内保管
の五つである¹¹⁾。これらの製造工程の内、③木質チップのパルプ化と④パルプから紙への加工は全工程が機械化されているため、作業者が線源である木質チップや紙に接する時間は他の作業に比べ小さい。よってパルプから紙への加工に伴う被ばくは、③及び④以外のすべての作業を行う作業者の被ばく、及び、運搬経路と製造施設周辺の居住者の被ばくを評価対象とする。ただし、③木

質チップのパルプ化(化学パルプ)の工程では、放射性セシウムの濃縮が起こることが実験的に確かめられている^{12, 13)}。③木質チップのパルプ化から④パルプから紙への加工までの一連の流れを Fig. 2 に示す。化学パルプは、

1. 蒸解(木質チップを薬品(白液)とともに高温で煮込み繊維質を取り出す)
2. 洗浄・漂白(取り出した繊維質を洗浄・漂白し、パルプとして紙の原料に使用する)
3. 回収ボイラー(蒸解の後残った薬品(黒液)を燃焼させる)
4. 苛性化(燃焼後の残渣(緑液)を生石灰と混ぜ白液

Fig. 2 Paper manufacturing process (Flow of step 3 to 4).

(Numbers in parentheses behind each generated substances are cesium concentration on basis of that of wooden chips. ¹³⁾)

に戻す)

の各工程を繰り返しながら作られる。化学パルプの製造工程で生じる物質の中で木質チップ中のセシウム濃度に対する濃縮係数が大きいのは、黒液（約 27 倍）と回収ボイラーに付着した灰（約 200 倍）である。黒液の製造工程は機械化されているものの、濃縮係数が大きいために黒液を保管するタンクの周辺にいる作業者の被ばくが大きい可能性がある。また大規模な製紙施設では、回収ボイラーは高さ数十 m に及ぶ大きなものであるため¹⁴⁾、清掃作業等の補修のために作業者が中に入る可能性があると考えた。よって上で示した評価の対象者に加え、黒液周辺作業者及び回収ボイラーの補修作業者の被ばくを評価対象とする。

製品化された紙の種別のうち、もっとも生産量が多いのは段ボール原紙である¹⁵⁾。汚染された木質チップにより作られた段ボール原紙を用いた段ボールの製造・利用に伴い、作業や公衆が被ばくする可能性がある。段ボールの製造・利用に伴う被ばくの中で、線源である板紙や段ボールの規模がもっとも大きいのは、段ボール製造施設内の板紙ロール倉庫及び段ボール倉庫からの被ばくである。これらの倉庫は大きさが同程度であり、また段ボールの密度は板紙ロールの 10 分の 1 程度であるため、段ボール倉庫による外部被ばくは板紙ロール倉庫に比べ小さい。よって段ボールの製造・利用に伴う被ばくは、段ボール製造施設内の板紙ロール倉庫内作業者及び倉庫周辺居住者の被ばくを評価対象とする。Table 2 に、製紙への再利用に対する評価経路を示す。

(3) 堆肥

木質チップから作られる堆肥は、一般に糞尿等を木質チップと混合し、発酵（一次発酵及び二次発酵）させることで作られる。堆肥の原材料への糞尿等の混合割合は製品によって大きく異なるため、本評価では保守的に木質チップのみから作られる堆肥を想定する。堆肥の製造工程は大きく分けて、

- ①木質チップの一次発酵場への運搬・積み下ろし
- ②一次発酵場での発酵むら解消のための攪拌作業
- ③一次発酵場から二次発酵場への移動
- ④二次発酵場での温度管理
- ⑤堆肥の袋詰め作業
- ⑥製品化された堆肥の倉庫内保管

の六つである⁸⁾。堆肥製造施設内での一次発酵場・二次発酵場の位置は施設によって異なるが、本評価では一次発酵場と二次発酵場が隣接しており、隣接した発酵場の間で②～⑤の各作業を行う作業者が被ばくする場合を保守的に想定する。このとき、②～⑤の各作業で線源である発酵場と作業者の距離は同程度であると考えられる。⑤堆肥の袋詰め作業は機械によって行われるため、作業者が線源に接する時間は他の時間に比べ小さい。また、②～④の作業の中で、作業回数・時間がもっとも長いのは②攪拌作業である。よって、②～⑤の作業に対する被ばくは、もっとも被ばく線量が大きいと考えられる②攪拌作業を評価し、その他の作業は評価対象から除外する。以上より、堆肥の製造に伴う被ばくは①木質チップの運搬・積み下ろし、②攪拌作業、⑥堆肥の倉庫内保管の作業を行う作業者の被ばく、及び、運搬経路と製造施設周辺居住者の被ばくを評価対象とする。

Table 2 Description of exposure pathways for paper.

No.	Description	Radioactive source	Exposed individual	Category of exposure
201	Transportation	wooden chips	Worker	External
202	Residence near the transportation pass		Public (child)	External
203–205	unloading		Worker	External, Inhalation, Ingestion
206–208	Work in a yard storing wooden chips			External, Inhalation, Ingestion
209	Work around a black liquor tank	Black liquor		External
210–212	Maintenance of a recovery boiler	Ash in a recovery boiler		External, Inhalation, Ingestion
213	Residence near the paper factory	A wooden chip yard	Public (child)	External
214	Work in a warehouse of rolls of paperboard	Paperboard	Worker	External
215	Residence near the paper factory	A warehouse of rolls of paperboard	Public (child)	External

製品化された堆肥は、主に畑に利用される。堆肥の利用に伴う被ばくは、堆肥を使用した農耕土壌での農耕作業者の被ばく、及び、堆肥を用いて生産された農作物を摂取する公衆の被ばくを評価対象とする。Table 3 に、堆肥への再利用に対する評価経路を示す。

(4) バイオマス発電

木質チップを用いたバイオマス発電では、木質チップを直接燃焼して発生した高温高熱の蒸気で発電機を回し、電気を発生させる。バイオマス発電は、バイオマス発電所だけでなく、パーティクルボード及び製紙施設において自家バイオマス発電として行われている。福島県近隣におけるバイオマス発電所の規模に比べ、パーティクルボード製造施設での自家発電の規模は10分の1程度、製紙施設での自家発電の規模はバイオマス発電所と同程度である¹⁶⁾。ただし、国内で製紙製造に用いられる木質チップのうち約7割は輸入品であることから¹⁷⁾、汚染された可能性のある木質チップの使用量はバイオマス発電所がもっとも大きいと考えられる。よって以下では、バイオマス発電所に対し評価を行う。バイオマス発電の作業工程は大きく分けて、

- ①木質チップの運搬・積み下ろし
- ②サイロ内での木質チップの保管
- ③木質チップのボイラーでの燃焼
- ④バグフィルターによる燃焼ガス中の飛灰の捕集
- ⑤蒸気タービン発電機による発電
- ⑥焼却灰のバンカー内保管
- ⑦焼却灰の処分場への輸送

の七つである¹⁸⁾。このうち、⑥及び⑦の焼却灰に係わる作業は、現在焼却灰に対して一般廃棄物最終処分場で処分できる濃度が定められており¹⁹⁾、発電所において焼却

灰中の放射性物質の濃度測定等の管理が行われていることから、評価対象から除外する。また、③及び④の工程は機械により行われるため、作業者が線源である木質チップや焼却灰に接する時間は他の作業に比べ短い。しかし③木質チップのボイラーでの燃焼については、バイオマス発電を主力事業として行う発電所では一般にボイラーの大きさが高さ数十mに及ぶため、ボイラー内に作業者が入って補修を行う可能性があり、その際にボイラーに付着した焼却灰により被ばくする可能性がある。よってバイオマス発電に伴う被ばくは、①木質チップの運搬・積み下ろし、②サイロ内での木質チップの保管、③燃焼ボイラーの補修作業を行う作業者の被ばく、及び、運搬経路と発電所周辺居住者の被ばくを評価対象とする。

また、汚染された木質チップを使用したバイオマス発電所から大気中に放出された微量の粉塵に、放射性セシウムが含まれる可能性がある。よってそれに伴う公衆の被ばくとして、放出した粉塵による被ばく、粉塵が沈着した土壌からの被ばく、粉塵が沈着した土壌で生産された農作物及びその農作物を飼料として生産された畜産物を摂取することによる被ばくを評価対象とする。Table 4 に、バイオマス発電への再利用に対する評価経路を示す。

(5) マルチング材

木質チップは雑草侵入の抑制や舗装等のために、さまざまな場所で土壌の表面に敷設され、マルチング材として利用される。木質チップをマルチング材に利用する際の作業工程は大きく分けて、

- ①敷設場所への木質チップの運搬・積み下ろし
- ②木質チップの敷設作業

Table 3 Description of exposure pathways for compost.

No.	Description	Radioactive source	Exposed individual	Category of exposure
301	Transportation	wooden chips	Worker	External
302	Residence near the transportation pass		Public (child)	External
303-305 306-308	unloading Mixing		Worker	External, Inhalation, Ingestion External, Inhalation, Ingestion
309	Work in a warehouse of compost	compost		External
310	Residence near the compost factory	A place for fermentation	Public (child)	External
311-312	Agriculture	Soil contained the compost	Worker	External, Inhalation
313-314	Ingestion of crops	Crops cultivated with the compost	Public (adult, child)	External

Table 4 Description of exposure pathways for biomass power generation.

No.	Description	Radioactive source	Exposed individual	Category of exposure
401	Operation of a biomass power plant	Wooden chips	Worker	External
402			Public (child)	External
403–405			Worker	External, Inhalation, Ingestion
406–409				External, Inhalation, Ingestion
409–411		Ash in a incinerator		External
412	Around the plant	Wooden chip silo	Public (child)	External
413–416		Dust in downwind plume released from the incinerator	Public (adult, child)	External, Inhalation
417–418		Soil in which dust deposited	Public (adult, child)	External
419–420		Crops cultivated in the soil in which dust deposited	Public (adult, child)	Ingestion
421–422		Livestock grown with the feeds cultivated with the soil	Public (adult, child)	Ingestion

の二つである。マルチング材の利用用途²⁰⁾の中で、使用規模が大きくかつ作業員及び公衆への被ばくの影響が大きいと想定されるものに、公園及び歩道がある。それらの敷設作業に伴う作業員、及び、運搬経路と敷設場所周辺居住者の被ばくを評価対象とする。また、マルチング材が敷設された公園及び歩道の利用者の被ばくを評価する。**Table 5**に、マルチング材への再利用に対する評価経路を示す。

2. 評価モデル

木質チップの再利用に関する各評価経路のモデル式は、原子力施設等に対するクリアランスレベル算出に使用したモデル式^{1,2)}及び災害廃棄物の処理・処分に係わる安全性評価のモデル式²¹⁾を基に、本評価経路に即した評価パラメータを用いてモデル式を作成した。木質

チップの再利用の線量計算に使用した一連のモデル式を付録に示す。一連のモデル式による線量計算は、原子力機構で開発したPASCLR2²²⁾により行った。

また、外部被ばく線量の計算に必要な外部被ばく線量換算係数 $((\text{Sv/h})/(\text{Bq/kg}))$ は、点減衰核積分法による遮蔽計算コードQAD-CGGP2R²³⁾を用いて算出したが、スカイシャインによる効果を考慮する必要がある場合は、3次元輸送計算コードMCNP5²⁴⁾を使用して算出した。

3. 評価パラメータ

本研究で木質チップの再利用に対する線量評価を行う際に使用するパラメータは、既往のクリアランスレベル評価^{1,2)}を踏襲できると考えられるもの（内部被ばくに関するパラメータ（呼吸量や空気中ダスト濃度など）や焼却に関するパラメータ（燃焼におけるCsの排気への

Table 5 Description of exposure pathways for mulch.

No.	Description		Radioactive source	Exposed individual	Category of exposure
501	transportation	Transportation	Wooden chips	Worker	External
502		Residence near the transportation pass		Public (child)	External
503–505	Mulching a park	Mulching a park		Worker	External, Inhalation, Ingestion
506–508		Residence near the park		Public (child)	External, Inhalation, Ingestion
509–510		Use of the park		Public (adult)	External, Inhalation
511–513				Public (child)	External, Inhalation, Ingestion
514–516	Mulching a pavement	Mulching a pavement		Worker	External, Inhalation, Ingestion
517–519		Residence near the pavement		Public (child)	External, Inhalation, Ingestion
520–521		Use of the pavement		Public (adult)	External, Inhalation
522–524				Public (child)	External, Inhalation, Ingestion

移行割合など)等)は、既往のクリアランスレベル評価における設定と同一の値を使用した。木質チップの再利用に対する評価上新たに設定する必要があるパラメータは、福島県近隣における木質チップの各用途における運搬から製品化までの一連の作業工程と公衆の最終的な製品の利用実態に応じて設定した。これらは既往のクリアランスレベル評価のパラメータ設定の考え方と同様に、データ数が数個程度しかないものに対しては保守的に最大値を、データ数の多いものに対しては平均値を選定した。**Table 6** に、本解析のために新たに設定したパラメータの一覧を示す。

また、木質チップの再利用に係わる外部被ばくの評価体系についても、既往のクリアランスレベル評価での体系を踏襲できると考えられるもの(焼却により放出された粉塵による外部被ばくの評価体系など)は、既往の設

定と同一の評価体系を使用した。福島県近隣における木質チップの各再利用用途における利用実態を踏まえて新たに設定した体系、及び、それに基づき算出した外部被ばく線量換算係数の一覧を、**Table 7**に示す。なお、ストックヤードや倉庫周辺居住者の外部被ばくの評価に必要な線源から居住場所までの距離は、既往の災害廃棄物の外部被ばく評価²¹⁾におけるもっとも近い条件の2mとした。ここで、子どもに対する外部被ばく線量換算係数は、既往のクリアランスレベル評価に従い、成人に対する係数の1.3倍とした。

III 解析結果と考察

前節で示した評価方法に基づき、全Cs濃度が1Bq/kgの木質チップを再利用した場合に作業者及び公衆が受ける各評価経路における年間被ばく線量の評価を行っ

Table 6 Main Parameter list used for dose calculation.

Use	Parameters	Unit	Values	Setting basis
All usage	Density of wooden chips	g/cm ³	0.22	Density of wooden chips (water content(DB):50%) is chosen from research at a forest and forestry center in Fukuoka. ²⁹⁾
	Working time of transporting chips	h/y	2,000	Working time of transporting chips is conservatively assumed to be 2000h/y (= 8h/d × 250d/y).
	Mixing rate of contaminated chips in all chips used for making particle board	—	1	Mixing rate of contaminated chips in all chips used for making particle board is conservatively assumed to be 1.
Particle board	Annual usage of contaminated wooden chips	t/y	120,000	Annual usage of wooden chips in the largest particle board factory around Fukushima ³⁰⁾ is chosen.
	Mixing rate of contaminated chips in particle board	—	0.93	Mixing rate of resin in particle board (7-13%) at the largest particle board factory is conservatively assumed to be 7%.
	Density of particle board	g/cm ³	0.76	Average density of major types of particle board manufactured at the largest particle board factory around Fukushima is chosen.
	Thickness of particle board	cm	2	About 80% of particleboards produced in Japan are lower than 2cm. ³⁰⁾
	Mixing rate of contaminated chips in all chips used for making paper	—	0.3	70% of chips used for making paper are imported chips in Japan ¹⁷⁾ . The rest of chips are conservatively assumed to be contaminated.
Paper	Annual usage of contaminated wooden chips	t/y	324,000	It is assumed that annual usage of contaminated of wooden chips = annual usage of wooden chips × mixing rate of contaminated chips, annual usage of wooden chips = annual production of pulp + annual production of black liquor. •Annual production of pulp : Generation rate of pulp is 2000t/d at the largest paper factory around Fukushima ²⁷⁾ . •Annual production of black liquor : Generation rate of black liquor is 1000t/d which corresponds to paper production rate 2000t/d in the largest paper factory around Fukushima. This value is calculated by ratio of annual paper production 26Mt ¹⁷⁾ and that of black liquor 14Mt ²⁸⁾ in Japan.
	Density of black liquor	g/cm ³	1.4	This is a density of black liquor (concentration rate: 60%) at 20°C. ²⁹⁾
	Working time near a black liquor tank	h/y	100	Working time near a black liquor tank is cited from IAEA-TECDOC-1376. ¹²⁾
	Radionuclide concentration factor of black liquor for wooden chips	—	27	Radionuclide concentration factor from wooden chips to black liquor is cited from IAEA-TECDOC-1376.
	Radionuclide concentration factor of ash for wooden chips	—	200	Radionuclide concentration factor from wooden chips to ash is cited from IAEA-TECDOC-1376.
	Maintenance time of a recovery boiler	h/y	120	Maintenance time of a recovery boiler is assumed to be 120h/y = 8h/d × 30d/y (30d/y : operation rate of recovery boiler is estimated as 90%).
	Mixing rate of contaminated chips in paperboard	—	0.0012	Mixing rate of contaminated chips in paperboard is assumed to be 0.0012=0.02 × (1-0.7) × (1-0.6) •Dilution factor from wooden chips to pulp from IAEA-TECDOC-1376 : 0.02 •Ratio of imported chips to all chips used for making pulp in Japan : 0.7 •Ratio of recovered paper used for making paper to production of paper in Japan : 0.6 ¹⁷⁾
	Density of paper	g/cm ³	0.82	Density of wood-free paper which has the largest density in paper types is conservatively chosen. ³⁰⁾
	Mixing rate of contaminated chips in compost	—	1	Compost made from only chips is assumed.
	Annual usage of contaminated wooden chips	t/y	1,200	Mixing rate of contaminated chips in compost is conservatively assumed to be 1.
Compost	Density of compost	g/cm ³	0.5	Annual usage of wooden chips in the largest compost factory around Fukushima ²⁹⁾ is chosen.
	Depth of cultivation	cm	10	Density of compost 0.5g/cm ³ is calculated from weight and volume of compost made from wood and leaves (1 pack (40L) = 20kg). ³¹⁾
	Annual usage of compost	t/10a	6	Depth of cultivation is about 10cm in general.
	Mixing rate of contaminated chips in biofuel	—	1	The largest value of annual usage of compost for vegetables in Fukushima is conservatively selected. ²⁹⁾
Biomass power plant	Annual usage of contaminated wooden chips	t	120,000	Biomass power plant is assumed to use only chips for fuel.
	Maintenance time of an incinerator	h/y	120	Mixing rate of contaminated chips in biofuel is conservatively assumed to be 1.
	Burn rate of the incinerator	g/s	4,200	Annual usage of wooden chips in the largest biomass power plant around Fukushima ¹⁸⁾ is chosen.
	Mixing rate of contaminated chips in mulch	—	1	Maintenance time of a recovery boiler is assumed to be 120h/y = (8h/d × 30d/y)/2. (30d/y; the operation rate of recovery boiler is estimated as 90%).
Mulch	Annual usage of wooden chips	t	22,000	Burn rate is calculated by annual usage of chips 12Mt in the largest biomass power plant around Fukushima.
				Mulch is assumed to consist of only chips.

(*) Annual usage of contaminated chips is used for evaluation of volume of stockpiled chips in factory or plant and evaluation of exposed time of public living near transportation pass

Table 7 Effective dose conversion factors of external exposure pathways.

No.	Conditions to estimate effective dose conversion factor of external exposure pathway ($\mu\text{Sv/h}$ per Bq/g)	Cs-134	No.	Conditions to estimate effective dose conversion factor of external exposure pathway ($\mu\text{Sv/h}$ per Bq/g)	Cs-134
		Cs-137			Cs-137
101 201 301 401 501	A 12t track whose container is filled with contaminated wooden chips is assumed. •Source size : length 9.5m $\times$ width 2.3m $\times$ height 2.5m (cuboid) •Density : 0.22g/cm ³ •Evaluation point : 1m from the center of 2.3m $\times$ 2.5m surface	1.2E-01 4.3E-02	209	A black liquor tank with 5mm iron is assumed. Size of tank is cited from IAEA-TECDOC-1376. •Source size : height and diameter 8.6m (cylinder) •Density : 1.4g/cm ³ •Evaluation point : 1m from edge of bottom face of the tank in the horizontal direction and 1m in height from the ground	1.0E-01 3.7E-02
102 202 302 402 502	A 12t track whose container is filled with contaminated wooden chips is assumed. •Source size : length 9.5m $\times$ width 2.3m $\times$ height 2.5m (cuboid) •Density : 0.22g/cm ³ •Evaluation point : 3m from long edge of bottom face in the width direction	3.4E-02 1.2E-02	210	A recovery boiler corresponding to generation rate of black liquor 1000t/d in the largest paper factory around Fukushima is assumed. Thickness and density of ash are cited from the conventional clearance level estimation. •Source size : ash of 2cm thickness adhered with flooring and walls of recovery boiler (length 10m $\times$ width 10m $\times$ height 60 m (cuboid)) •Density : 0.65g/cm ³ •Evaluation point : 1m in height from the center of flooring	4.1E-02 1.5E-02
103 203 303 403 503	A 12t track whose container is filled with contaminated wooden chips is assumed. •Source size : length 9.5m $\times$ width 2.3m $\times$ height 2.5m (cuboid) •Density : 0.22g/cm ³ •Evaluation point : 1m from long edge of bottom face in the width direction	1.1E-01 4.0E-02	214	A warehouse storing paper for a week production in the largest paper factory around Fukushima is assumed. •Source size : 2 walls of paperboard rolls placed with 5m interval - roll size : diameter and height : 1m - wall size : length 50m $\times$ width 1m $\times$ height 4m •Density of wall : 0.82g/cm ³ •Evaluation point : 1m from the wall (= 4m from another wall) and 1m in height from the ground	2.4E-01 8.7E-02
106 111	A wooden chip yard storing usage of wooden chips for a week in the largest particle board factory around Fukushima is assumed. •Source size : top surface 90m square, bottom surface 100m square, height 6m (quadrilateral frustum) •Density : 0.22g/cm ³ •Evaluation point : 1m in height from the center of top surface (106), 2m from edge of bottom face in the width direction and 1m in height from the ground (111)	3.7E-01 1.3E-01 9.9E-02 3.6E-02	215	A warehouse storing paper for a week production in the largest paper factory around Fukushima is assumed. •Source size : a warehouse with 5mm thickness iron wall (160m $\times$ 100m $\times$ 6m) storing 14 $\times$ 10 units of stockpiled paperboard rolls placed with 5m interval (1 unit = 11m $\times$ 2m $\times$ 4m) •Density of wall : 0.82cm ³ •Evaluation point : 2m from edge of bottom face in the width direction and 1m in height from the ground	7.8E-02 2.9E-02
109 112	Wooden chip silos in a particle board factory around Fukushima are assumed. •Source size : 3 tanks with 5mm iron wall (diameter and height 20m) placed in straight line with 2m interval •Density : 0.22g/cm ³ •Evaluation point : 1m from edge of bottom face of the center tank in the horizontal direction and 1m height from the ground (109), 2m from edge of bottom face in the horizontal direction and 1m in height from the ground (112)	8.8E-02 3.1E-02 9.2E-02 3.3E-02	306 310	A place for fermentation storing annual production of compost in the largest compost factory around Fukushima is assumed. •Source size : 2 stockpiles of compost (top surface 30m $\times$ 5m, bottom surface 40m $\times$ 10m, height 4.5m (quadrilateral frustum)) placed with 10m interval •Density : 0.5g/cm ³ •Evaluation point : 1m from long edge of bottom face in the width direction and 1m in height from the ground (306), 2m from long edge of bottom face in the width direction and 1m height from the ground (310)	8.7E-02 3.1E-02 1.7E-02 6.2E-03
110	A warehouse storing particle boards for a week production in the largest particle board factory around Fukushima is assumed. •Source size : 2 walls of stockpiled particle boards placed with 5m interval (1 wall size = 50m $\times$ 1.8m $\times$ 4m) •Density : 0.76g/cm ³ •Evaluation point : 1m from the wall (= 4m from another wall) and 1m in height from the ground	2.5E-01 8.8E-02	311	A field applied 6t of compost per 10a is assumed. Size of field is cited from the conventional clearance level estimation. •Source size : diameter 1km $\times$ height 10cm (cylinder) •Density : 1.38g/cm ³ (compost density=0.5g/cm ³ , soil density = 1.5g/cm ³) •Evaluation point : 1m in height from top surface.	1.4E-02 5.0E-03
113	A warehouse storing particle boards for a week production in the largest particle board factory around Fukushima is assumed. •Source size : a warehouse with 5mm iron wall (length 80m $\times$ width 50m $\times$ height 6m) storing 7 $\times$ 5 units of stockpiled particle boards placed with 5m interval (1 unit size = 10.8m $\times$ 1.8m $\times$ 4m) •Density : 0.76g/cm ³ •Evaluation point : 2m from the wall of warehouse and 1m in height from the ground	9.8E-02 3.5E-02	406 412	A wooden chip silo with 5mm iron wall storing usage of wooden chips for a week in the largest biomass power plant around Fukushima is assumed. •Source size : top surface 45m $\times$ 5m, bottom surface 45m $\times$ 20m, height 10m (quadrilateral frustum) •Density : 0.22/cm ³ •Evaluation point : 1m from long edge of bottom face in the width direction and 1m in height from the ground (406), 2m from long edge of bottom face in the width direction and 1m height from the ground (412)	1.0E-01 3.6E-02 7.0E-02 2.5E-02
118	A room made of particle board is assumed. Size of room is cited from the conventional clearance level estimation. •Source size : ceiling and flooring : 9.0m $\times$ 9.0m $\times$ 2cm walls (3 surfaces) : 9.0m $\times$ 2.4m $\times$ 2cm •Density : 0.76g/cm ³ •Evaluation point : 1m in height from the center of flooring	2.0E-03 7.2E-04	409	An incinerator corresponding to usage of wooden chip 300t/d in the largest biomass power plant around Fukushima is assumed. Thickness and density of ash are cited from the conventional clearance level estimation. •Source size : ash of 2cm thickness adhered with ceiling, flooring and walls of an incinerator (length 5.2m $\times$ width 5.2m $\times$ height 20m (cuboid)) •Density : 0.65g/cm ³ •Evaluation point : 1m in height from the center of bottom	3.6E-02 1.3E-02
120	A bed made of particle board is assumed. Size of bed is cited from the conventional clearance level estimation. •Source size : 2m $\times$ 2m $\times$ 20cm (A bed consists of upper and 4 side frames whose thickness are 2cm.) •Density : 0.76g/cm ³ •Evaluation point : 10cm from the center of upper surface of the bed	4.4E-02 1.6E-02	503 509 511 505 507	A park whose size is so broad that calculated dose converges. Thickness of mulching is estimated to be 5cm by compressing from general maximum thickness 10cm. •Source size : diameter 1km $\times$ height 5cm (cylinder) •Density : 0.44g/cm ³ •Evaluation point : 1m from the center of upper surface (503,509,511), 1m from edge of bottom face in the horizontal direction and 1m from the ground (505,507)	9.0E-02 3.3E-02 3.2E-02 1.2E-02
206 213	A wooden chip yard in the largest paper factory around Fukushima storing usage of wooden chips for a week is assumed. •Source size : top surface 130m square, bottom surface 150m square, height 6.3m (quadrilateral frustum) •Density : 0.22g/cm ³ •Evaluation point : 1m in height from the center of upper surface (206), 2m from edge of bottom face in the width direction and 1m in height from the ground (213)	3.9E-01 1.4E-01 7.8E-02 2.9E-02	514 520 522 516 518	A pavement whose size is so broad that calculated dose converges. Thickness of mulching is estimated to be 5cm by compressing from general maximum thickness 10cm. •Source size : length 100m $\times$ width 5.5m $\times$ height 5cm (cuboid) •Density : 0.44g/cm ³ •Evaluation point : 1m from the center of upper surface (514,520,522), 1m from edge of top face in the width direction and 1m from the ground (516,518)	4.4E-02 1.6E-02 2.9E-02 1.0E-02

た。全Cs濃度に対する被ばく線量は、Cs-134とCs-137のそれぞれに対して求めた被ばく線量を、事故当初のそれぞれの存在比が等しいと仮定した場合の事故2年後の存在比(Cs-134/Cs-137=0.535)を用いることで導出した。ここで、事故後の年数が経過するほど全Cs濃度が1 Bq/kgの場合に受ける被ばく線量は小さくなるので、事故2年後の結果はそれ以上の期間に対して保守的な結果となる。これは、事故後の評価時点が早いほどCs-137に対するCs-134の存在比が大きく、また、Cs-134はCs-137に比べ放出する γ 線のエネルギーが高く影響が大きいためである。

線量の評価結果から、木質チップの各再利用用途に対し、作業員及び公衆の被ばくを抑制するために満たすべき基準線量に対応する木質チップ中の全Cs濃度を算出し、その中でもっとも低い全Cs濃度の結果を各再利用用途に対する濃度のめやす値として求めた。基準線量については、原子力安全委員会の考え方³⁴⁾では、汚染した廃棄物の処理等に当たる作業員や処理に伴って周辺住民の受ける影響については、合理的に達成できる限り低くなるよう対策が講じられることが重要と述べた上で、具体的には1 mSv/年を超えないようにすることが必要としている。また、再利用して生産された製品についてはクリアランスレベルを準用し、市場に流通する

前に10 μ Sv/年以下とすることが必要であると述べられている。本研究ではこの考え方にに基づき、木質チップを利用した製品の製造に係る作業員・一般公衆に対しては1 mSv/年、木質チップを利用した製品の使用に係る作業員・一般公衆に対しては10 μ Sv/年を基準線量とした。

以下に各再利用用途に対する評価結果を示す。

1. パーティクルボード

パーティクルボードに対する線量評価の結果を、Table 8に示す。Table 8において、経路番号が白枠で表されている経路(No. 101 ~ 113)は基準線量を1 mSv/y、経路番号が灰色枠で表されている経路は基準線量を10 μ Sv/yと設定した。以下他の再利用用途についても、各経路に対する基準線量を表中で同様に示す。

木質チップのパーティクルボードへの再利用において、年間被ばく線量が高かったのは、木質チップ製造施設の周辺居住者の外部被ばく(No. 110, 111, 112)であった。これらの被ばく経路で線量が高いのは、被ばく時間(=居住時間を8,760 h/y=24時間×365日と仮定した)が他の被ばく経路に比べて長いためである。一方、塵埃吸入による内部被ばくや経口摂取による内部被ばくは、外部被ばくに比べ数桁程度小さくなる傾向が確かめられた。(たとえば経路No. 103, 104, 105(木質チップの

Table 8 Annual effective dose for wooden chips of 1 Bq/kg of Cs (134+137) and radioactive concentration of wooden chips for particle board corresponding to dose criteria.

No.	Exposure pathway	Annual effective dose (μ Sv/y per Bq/kg)	Radioactive concentration of wooden chips corresponding to standard dose (Bq/kg)
101	Transportation of wooden chips (external)	1.1E-01	8.8E+03
102	Residence near the transportation pass (child, external)	1.5E-03	6.6E+05
103	Loading and unloading of wooden chips (external)	5.2E-02	1.9E+04
104	Loading and unloading of wooden chips (inhalation)	1.7E-05	5.8E+07
105	Loading and unloading of wooden chips (ingestion)	2.8E-04	3.6E+06
106	Working near a wooden chip yard (external)	7.7E-02	1.6E+04
107	Working near a wooden chip yard (inhalation)	1.7E-05	5.8E+07
108	Working near a wooden chip yard (ingestion)	2.8E-04	3.6E+06
109	Working near a wooden chip silo (external)	4.6E-02	2.2E+04
110	Working in a warehouse of particle board (external)	1.2E-01	8.2E+03
111	Residence near the wooden chip yard (child, external)	4.6E-01	2.2E+03
112	Residence near the wooden chip silo (child, external)	4.2E-01	2.4E+03
113	Residence near the warehouse (child, external)	4.2E-01	2.4E+03
114	Building a house with the particle board (inhalation)	1.6E-05	6.3E+05
115	Building a house with the particle board (ingestion)	2.6E-04	3.8E+04
116	Residence near the construction site (adult, inhalation)	7.7E-05	1.3E+05
117	Residence near the construction site (child, inhalation)	2.0E-05	4.9E+05
118	Residence in the house (adult, external)	8.6E-03	1.2E+03
119	Residence in the house (child, external)	1.1E-02	8.9E+02
120	Use of a bed made of the particle board (adult, external)	6.5E-02	1.5E+02
121	Use of a bed made of the particle board (child, external)	8.5E-02	1.2E+02

1E+02 1E+04 1E+06 1E+08

積み下ろし作業者の被ばく)では, 内部被ばく線量 (No. 104, 105) は外部被ばく線量 (No. 103) に比べ2~3桁程度小さくなった。)

基準線量に対応する木質チップ中の全Cs濃度がもっとも低かったのは, ベッドの使用者 (子ども) に対する外部被ばく (No. 121) の120 Bq/kgであった。この濃度は, パーティクルボードへの再利用に対する木質チップ中の全Cs濃度のめやす値であり, 120 Bq/kg以下の木質チップならば, パーティクルボードに再利用してもすべての被ばく経路で作業者及び公衆が受ける被ばく線量が基準線量を下回る。ベッドの使用者 (子ども) に対する外部被ばく (No. 121) がこのめやす値を決める経路となっ

たのは, この経路に対する基準線量が10 μ Sv/yであり, さらに, ベッドと使用者の距離が近い (ベッド表面から10 cmの位置に使用者がいると仮定した) ため, 被ばく線量が大きいためである。

2. 製紙

製紙に対する線量評価の結果を, **Table 9** に示す。

木質チップの製紙への再利用において, 作業者の年間被ばく線量が高かったのは, 黒液タンク周辺作業者 (No. 209) 及び回収ボイラーの補修作業者 (No. 210) の外部被ばくであった。これらの経路で被ばく線量が高くなったのは, 木質チップに対する黒液及び回収ボイラー内の

Table 9 Annual effective dose for wooden chips of 1 Bq/kg of Cs (134+137) and radioactive concentration of wooden chips for paper corresponding to dose criteria.

No.	Exposure pathway	Annual effective dose (μ Sv/y per Bq/kg)	Radioactive concentration of wooden chips corresponding to standard dose (Bq/kg)
201	Transportation of wooden chips (external)	1.1E-01	8.8E+03
202	Residence near the transportation pass (child, external)	4.1E-03	2.4E+05
203	Loading and unloading of wooden chips (external)	5.2E-02	1.9E+04
204	Loading and unloading of wooden chips (inhalation)	1.7E-05	5.8E+07
205	Loading and unloading of wooden chips (ingestion)	2.8E-04	3.6E+06
206	Working near a wooden chip yard (external)	8.2E-02	2.1E+04
207	Working near a wooden chip yard (inhalation)	1.7E-05	5.8E+07
208	Working near a wooden chip yard (ingestion)	2.8E-04	3.6E+06
209	Working near a black liquor tank (external)	2.4E-01	4.2E+03
210	Maintenance of a recovery boiler (external)	5.2E-01	1.9E+03
211	Maintenance of a recovery boiler (inhalation)	4.1E-04	2.4E+06
212	Maintenance of a recovery boiler (ingestion)	6.7E-03	1.5E+05
213	Residence near the wooden chip yard (child, external)	3.6E-01	2.8E+03
214	Working in a warehouse of rolls of paperboard (external)	1.5E-04	6.6E+04
215	Residence near the warehouse (child, external)	3.3E-04	3.1E+04

1E+02 1E+04 1E+06 1E+08

Table 10 Annual effective dose for wooden chips of 1 Bq/kg of Cs (134+137) and radioactive concentration of wooden chips for compost corresponding to dose criteria.

No.	Exposure pathway	Annual effective dose (μ Sv/y per Bq/kg)	Radioactive concentration of wooden chips corresponding to standard dose (Bq/kg)
301	Transportation of wooden chips (external)	1.1E-01	8.8E+03
302	Residence near the transportation pass (child, external)	1.8E-05	5.6E+07
303	Loading and unloading of wooden chips (external)	5.2E-02	1.9E+04
304	Loading and unloading of wooden chips (inhalation)	1.7E-05	5.8E+07
305	Loading and unloading of wooden chips (ingestion)	2.8E-04	3.6E+06
306	Turning and Mixing of compost (external)	1.8E-02	5.5E+04
307	Turning and Mixing of compost (inhalation)	1.7E-05	5.8E+07
308	Turning and Mixing of compost (ingestion)	2.8E-04	3.6E+06
309	Working in a warehouse of compost (external)	6.9E-02	1.4E+04
310	Residence near the factory (child, external)	7.9E-02	1.3E+04
311	Agriculture with the compost (external)	3.7E-03	2.7E+03
312	Agriculture with the compost (inhalation)	2.1E-06	4.9E+06
313	Ingestion of crops (adult, ingestion)	8.0E-04	1.2E+04
314	Ingestion of crops (child, ingestion)	3.5E-04	2.9E+04

1E+02 1E+04 1E+06 1E+08

灰の放射性セシウムの濃縮が大きい（黒液で 27 倍，回収ボイラー内の灰で 200 倍）ために，黒液タンク周辺，及び，灰が付着したボイラー内の空間線量が高くなるためである。また，製紙への再利用に対する木質チップ中の全 Cs 濃度のめやす値は，回収ボイラー補修作業者の外部被ばく（No. 210）に対する 1,900 Bq/kg であった。この経路が濃度のめやす値を決める結果になったのは，上述したように回収ボイラー炉内の灰の濃縮係数が大きいためである。

3. 堆肥

堆肥に対する線量評価の結果を，Table 10 に示す。木質チップの堆肥への再利用において，年間被ばく線量が高かったのは，木質チップの運搬作業者（No. 301）であった。これは，運搬作業は他の作業に比べ作業時間が長い（2,000 h/y と仮定した）ためである。

堆肥への再利用に対する木質チップ中の全 Cs 濃度のめやす値は，農耕作業者の外部被ばく（No. 317）に対する 2,700 Bq/kg であった。またこの値は，各再利用用途に対する木質チップ中の全 Cs 濃度のめやす値の中で，もっとも高い値であった。これは，農耕作業に汚染された木質チップから作られた堆肥を使用するとき，堆肥を使用する土壌との攪拌により希釈が起こるので，堆肥

を使用した土壌からの外部被ばく線量が抑えられるためである。

また現在農林水産省では，肥料・土壌改良資材・培土及び飼料に対し安全に利用可能な放射性セシウム濃度の暫定許容値を 400 Bq/kg としている³⁵⁾。この濃度は汚染された肥料等を長期間施用しても原発事故前の農地土壌中の放射性セシウム濃度の範囲に収まる値として算出されたものであり，汚染された堆肥の製造・使用に伴う作業や公衆を対象とした線量評価に基づく安全性の確認は行われていない。本評価では保守的に堆肥を汚染した木質チップのみから製造すると仮定しているため，木質チップ中の Cs 濃度と堆肥中の Cs 濃度は同じである。本評価の結果，堆肥の再利用に対する全 Cs 濃度のめやす値は 2,700 Bq/kg となり，農林水産省による暫定許容値 400 Bq/kg の約 7 倍程度高い値となった。

4. バイオマス発電

バイオマス発電に対する線量評価の結果を，Table 11 に示す。木質チップのバイオマス発電への再利用において，年間被ばく線量をもっとも高かったのは，燃焼炉補修作業者の外部被ばく（No. 409）であった。また，バイオマスへの再利用に対する木質チップ中の全 Cs 濃度のめやす値は，同経路に対する 2,200 Bq/kg であった。

Table 11 Annual effective dose for wooden chips of 1 Bq/kg of Cs (134+137) and radioactive concentration of wooden chips for biomass power generation corresponding to dose criteria.

No.	Exposure pathway	Annual effective dose (μ Sv/y per Bq/kg)	Radioactive concentration of wooden chips corresponding to standard dose (Bq/kg)			
401	Transportation of wooden chips (external)	1.1E-01	8.8E+03			
402	Residence near the transportation pass (child, external)	1.5E-03	6.6E+05			
403	Loading and unloading of wooden chips (external)	5.2E-02	1.9E+04			
404	Loading and unloading of wooden chips (inhalation)	1.7E-05	5.8E+07			
405	Loading and unloading of wooden chips (ingestion)	2.8E-04	3.6E+06			
406	Working near a wooden chip silo (external)	2.1E-02	4.7E+04			
407	Working near a wooden chip silo (inhalation)	1.7E-05	5.8E+07			
408	Working near a wooden chip silo (ingestion)	2.8E-04	3.6E+06			
409	Maintenance of an incinerator (external)	4.6E-01	2.2E+03			
410	Maintenance of an incinerator (inhalation)	8.2E-04	1.2E+06			
411	Maintenance of an incinerator (ingestion)	6.7E-03	1.5E+05			
412	Residence near the wooden chip silo (child, external)	3.2E-01	3.1E+03			
413	Residence near the plant (dust plume) (adult, external)	9.9E-08	1.0E+08			
414	Residence near the plant (dust plume) (adult, inhalation)	6.9E-05	1.4E+05			
415	Residence near the plant (dust plume) (child, external)	1.3E-07	8.0E+07			
416	Residence near the plant (dust plume) (child, inhalation)	1.8E-05	5.5E+05			
417	Residence near the plant (soil) (adult, external)	1.3E-03	7.7E+03			
418	Residence near the plant (soil) (child, external)	1.7E-03	5.8E+03			
419	Ingestion of crops (adult, ingestion)	4.8E-06	2.1E+06			
420	Ingestion of crops (child, ingestion)	1.8E-06	5.5E+06			
421	Ingestion of livestock (adult, ingestion)	7.6E-06	1.3E+06			
422	Ingestion of livestock (child, ingestion)	3.9E-06	2.6E+06			

1E+02 1E+04 1E+06 1E+08

Table 12 Annual effective dose for wooden chips of 1 Bq/kg of Cs (134+137) and radioactive concentration of wooden chips and bark chips for mulch corresponding to dose criteria.

No.	Exposure pathway	Annual effective dose (μ Sv/y per Bq/kg)	Radioactive concentration of wooden chips corresponding to standard dose (Bq/kg)
501	Transportation of wooden chips (external)	1.1E-01	8.8E+03
502	Residence near the transportation pass (child, external)	2.7E-04	3.7E+06
503	Mulching a park (external)	4.8E-02	2.1E+04
504	Mulching a park (inhalation)	1.7E-05	5.8E+07
505	Mulching a park (ingestion)	3.0E-02	3.3E+02
506	Residence near the park (child, external)	1.7E-05	6.0E+05
507	Residence near the park (child, inhalation)	3.9E-02	2.6E+02
508	Residence near the park (child, ingestion)	4.3E-06	2.3E+06
509	Use of the park (adult, external)	1.9E-02	5.2E+02
510	Use of the park (adult, inhalation)	7.6E-07	1.3E+07
511	Use of the park (child, external)	2.5E-02	4.0E+02
512	Use of the park (child, inhalation)	2.0E-07	5.0E+07
513	Use of the park (child, ingestion)	2.0E-04	5.0E+04
514	Mulching a pavement (external)	2.3E-02	4.3E+04
515	Mulching a pavement (inhalation)	1.7E-05	5.8E+07
516	Mulching a pavement (ingestion)	2.6E-02	3.8E+02
517	Residence near the pavement (child, external)	1.7E-05	6.0E+05
518	Residence near the pavement (child, inhalation)	3.4E-02	2.9E+02
519	Residence near the pavement (child, ingestion)	4.3E-06	2.3E+06
520	Use of the pavement (adult, external)	9.3E-03	1.1E+03
521	Use of the pavement (adult, inhalation)	7.6E-07	1.3E+07
522	Use of the pavement (child, external)	1.2E-02	8.2E+02
523	Use of the pavement (child, inhalation)	2.0E-07	5.0E+07
524	Use of the pavement (child, ingestion)	2.0E-04	5.0E+04

1E+02 1E+04 1E+06 1E+08

この経路がもっとも線量が高く、濃度のめやす値を決める結果となったのは、焼却に伴う体積の減少により、焼却灰中の重量あたりの放射性セシウム濃度が木質チップ中の濃度が増加するので、焼却灰が付着した燃焼炉内の空間線量が高くなるためである。またこのめやす値はパーティクルボードや製紙におけるめやす値より高い値であるため、パーティクルボードや製紙施設で行われる自家バイオマス発電に対しても、パーティクルボードや製紙に対して求めた濃度のめやす値により安全が担保されているといえる。

5. マルチング材

マルチング材に対する線量評価の結果を、Table 12に示す。木質チップのマルチング材への再利用において、年間被ばく線量がもっとも高かったのは、木質チップの運搬作業者の外部被ばく（No. 501）であった。これは、他の作業に比べ作業時間が長い（2,000 h/yと設定した）ためである。また、マルチング材への再利用に対する木質チップ中の全Cs濃度のめやす値は、公園の周辺居住者（子ども）の外部被ばくに対する260 Bq/kgであった。この経路が濃度のめやす値を決める結果となったのは、この経路に対する基準線量が10 μ Sv/yであること、周

辺居住者の年間被ばく時間が長く、線源との距離が近い（敷設された公園の端から高さ1 mに居住していると想定した）ためである。

IV 結 論

福島第一原子力発電所事故に伴い大気中に放出された放射性セシウムにより汚染された可能性のある木材及び木質系廃棄物は、チップ化され木質チップとしてさまざまな用途に再利用されている。しかし、汚染された木材の再利用に対する線量評価は今まで行われておらず、現在それらの再利用は原子炉施設等で発生する金属やコンクリートに対するクリアランスレベルに基づき、放射性セシウムに対し100 Bq/kgを基準として行われている。そこで本評価では、汚染された可能性のある木材及び木質系廃棄物の再利用に対する評価を行うことを目的として、木質チップの主な5種類の再利用用途（パーティクルボード、製紙、堆肥、バイオマス発電、マルチング材）に対し網羅的な被ばく経路を設定した上で線量評価を行い、作業員や公衆の被ばくを抑えるために満たすべき基準線量に対応する木質チップ中の放射性セシウム濃度を各再利用用途に対して算出した。またその結果から、各再利用用途において、安全に再利用を行うための木質

チップ中の放射性セシウム濃度のめやす値を求めた。

その結果、各再利用用途に対する木質チップ中の全Cs濃度のめやす値がもっとも低かったのは、パーティクルボードへの再利用に対する120 Bq/kg（パーティクルボードを利用して作られたベッド使用者（子ども）の外部被ばく経路（基準線量：10 μ Sv/y）に対する値）であった。これは上述した100 Bq/kgというクリアランスレベルに基づく現在の基準値を上回っており、当該基準値が木質チップの再利用に対する作業者及び公衆の安全性を担保していることを確かめられた。

また、堆肥に対しては農林水産省が肥料等の基準値を400 Bq/kgと設定しているが、この基準に対する線量評価による安全性の評価は行われていなかった。今回の評価結果では、堆肥の再利用に対する基準線量に対する木質チップ中の全Cs濃度のめやす値は、2,700 Bq/kg（堆肥を使用する農耕作業者の外部被ばく経路（基準線量：10 μ Sv/y）に対する値）であった。この2,700 Bq/kgという値は、堆肥を汚染した木質チップのみから製造すると仮定した保守的な評価結果であるにもかかわらず、農林水産省が定めた暫定許容値の400 Bq/kgに比べ7倍程度高い値であり、肥料等への再利用の基準値が安全性を担保していることを確認した。

参 考 文 献

- 1) 原子力安全委員会；原子炉施設及び核燃料使用施設の解体等に伴って発生するもののうち放射性廃棄物として取り扱う必要のないものの放射能濃度について（平成16年12月，平成17年3月17日一部訂正及び修正）（2004）。
- 2) 文部科学省科学技術・学術政策局放射線安全規制検討会；放射線障害防止法に規定するクリアランスレベルについて（平成22年11月，平成24年3月一部訂正）（2010）。
- 3) 環境省；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関わるガイドライン）（2011）。
- 4) 中外テクノス（株）；平成24年度放射性物質の影響を受けた廃棄物由来再生製品調査業務報告書（再生製品編）（2013）。
- 5) 林野庁；平成24年度森林・林業白書（2013）。
- 6) 国土交通省総合政策局；建設リサイクルに関する今後の動向（2005）。
- 7) 農林水産省；畜産物生産費統計（平成24年度）（2012）。
- 8) 鮫川村豊かな土づくりセンターゆうきの郷土（さと）ホームページ，<http://www.vill.samegawa.fukushima.jp/page/page000697.html>，閲覧2014年6月4日。
- 9) DIFFENBACHE, Particleboard lines, <http://www.dieffenbacher.de/en/wood-based-panel-division/particleboard-lines.html>，閲覧2014年6月4日。
- 10) (財) 日本住宅・木材技術センター；木材需給と木材工業の現況（平成23年版），p. 139（2011）。
- 11) 日本製紙グループ，紙の豆知識，http://www.nipponpapergroup.com/npi_mame/tip/factory1.html，閲覧2014年6月4日。
- 12) IAEA-TECDOC-1376, Assessing radiation doses to the public from radionuclides in timber and wood products (2003)。
- 13) A. RAVILA, E. HOLM; Radioactive elements in the forest industry, *Sci. Total Environ.*, **157**, 339–356 (1994)。
- 14) K. HAAGA; Development path of Recovery Boilers from small ones to big ones and how we made it to happen, http://www.blcolloquium.eng.ufmg.br/files/presentations/S3/A9_Kari_Haaga.pdf，閲覧2014年6月4日。
- 15) 経済産業省；経済産業省生産動態統計（平成26年度）（2014）。
- 16) 環境省；平成24年度バイオマス発電燃料等に関する廃棄物該当性の判断事例集（2013）。
- 17) 日本製紙連合会，製紙産業の現状，<http://www.jpagr.jp/states/index.html>，閲覧2014年6月4日。
- 18) (株) ウッドパワー，(株) 白河ウッドパワー大信発電所概要，<http://www.fesco.co.jp/business/download/pdf/SWP.pdf>，閲覧2014年6月4日。
- 19) 環境省；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り扱いについて（2011）。
- 20) 群馬県環境森林部廃棄物・リサイクル課，群馬県産業廃棄物情報ホームページ，<http://www.gunma-sanpai.jp/gp06/003.htm>，閲覧2014年6月4日。
- 21) 日本原子力研究開発機構安全研究センター；福島県の浜通り及び中通り地方（避難区域及び計画的避難区域を除く）の災害廃棄物の処理・処分における放射性物質による影響の評価について，災害廃棄物安全評価検討会（第3回）資料4，平成23年6月19日（平成23年11月15日一部改正及び修正，災害廃棄物安全評価検討会（第9回）資料11-1）（2011）。
- 22) S. TAKEDA, M. KANNO, T. SASAKI, N. MINASE and H. KIMURA; Development of PASCLR code system version 2 to drive clearance levels of uranium and trans uranium

wastes, JAEA-Data Code 2006-003, p. 137 (2006).

- 23) Y. SAKAMOTO and S. TANAKA; QAD-CGGP2 and G33-GP2: Revised versions of QAD-CGGP and G33-GP, JAERI-M90-110 (1990).
- 24) X-5 Monte Carlo Team, MCNP-A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 5, LA-UR-03-1987 (2003).
- 25) 福岡県森林林業技術センター；木質ボイラー導入の手引き, <http://www.pref.fukuoka.lg.jp/gyosei-shiryo/boiler.html>, 閲覧 2014 年 6 月 4 日.
- 26) 日本ノボパン工業, <http://www.novopan.co.jp>, 閲覧 2014 年 6 月 4 日.
- 27) 日本製紙（株）石巻工場, <http://www.nipponpapergroup.com/about/branch/factory/npi/ishinomaki/>, 閲覧 2014 年 6 月 4 日.
- 28) 日本有機資源協会, 「平成 22 年度バイオマス資源活用促進事業」パンフレット, http://www.jora.jp/txt/bmt/pdf/biomass_project_20110208low.pdf, 閲覧 2014 年 6 月 4 日.
- 29) David T. Clay, Evaporation Principles & Black Liquor Properties, <http://www.tappi.org/content/events/08kros/handouts/3-1.pdf>, 閲覧 2014 年 6 月 4 日.
- 30) (株) 松下, 紙の重さ, 厚さ, 密度, <http://www.matsushita-paper.co.jp/contents/museum/index3.html>, 閲覧 2014 年 6 月 4 日.
- 31) 島根県, しまねグリーン製品カタログ, <http://www.pref.shimane.lg.jp/environment/kankyo/kankyo/junkan/s-green/>, 閲覧 2014 年 6 月 4 日.
- 32) 農林水産省；放射性セシウムを含む肥料・土壌改良資材・培土及び飼料の暫定許容値の設定について, <http://www.maff.go.jp/j/syouan/soumu/saigai/shizai.html>, 閲覧 2014 年 6 月 4 日.
- 33) (公財) 福島県都市公園・緑化協会；平成 25 年度事業報告及び附属明細書, <http://www.azumapark.or.jp/old/city-treeplant/index.php>, 閲覧 2014 年 6 月 4 日.
- 34) 原子力安全委員会；東京電力（株）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 (2011).
- 35) 農林水産省；放射性セシウムを含む肥料・土壌改良資材・培土及び飼料の暫定許容値の設定について (2012).

付 録

木質チップの再利用において線量計算に使用した一連のモデル式を付録に示す。

1. 木質チップ由来の評価対象物質中の核種濃度

時刻 t における木質チップ中の核種 i の濃度 $C_i(t)$ (Bq/kg) は, 次のように表される。

$$C_i(t) = C_i(0)\exp(-\lambda_i t) \quad (1)$$

λ_i : 核種 i の崩壊定数 (/y)

各評価経路において評価対象とする物質 (木質チップが再利用されてできた製品など) 中の濃度を $C_{M,i}$ とする。 $C_{M,i}$ は, 他の材料との混合, 化学的な製造プロセス, 焼却に伴う重量の変化に伴い, 元の木質チップ中の濃度から変化しうるので, それらを以下のように表す。

$$C_{M,i}(t) = C_i(t) \cdot MR \cdot CF \cdot DM \quad (2)$$

MR : 他の材料との混合による希釈係数 (—)

CF : 化学的な反応による濃縮または希釈係数 (—)

DM : 焼却に伴う減重比 (—)

2. 被ばく線量評価モデル

木質チップの再利用における, 核種 i による年間被ばく線量の評価モデルを示す。被ばく形態は, 外部被ばく, 粉塵吸入による内部被ばく, 汚染物の経口摂取による内部被ばくであり, 既往のクリアランスレベル評価及び災害廃棄物等の安全評価に使用されているモデルと共通である。また, これらの評価モデル式において評価開始時期を $t=0$ とし, 評価期間 $t=1$ 年の間に受ける線量を導出する。

(1) 外部被ばく

外部被ばく線量は, 次式で計算する。

$$D_{ext,i}(t) = C_{M,i}(0) \cdot F_s \cdot t_e \cdot DF_{ext,i} \cdot \frac{1 - \exp(-\lambda_i t)}{\lambda_i t} \quad (3)$$

$D_{ext,i}(t)$: 評価期間 t 中の外部被ばく線量 (Sv/y)

F_s : 遮へい係数 (—)

t_e : 被ばく時間 (h/y)

$DF_{ext,i}$: 外部被ばく線量換算係数 ((Sv/h)/(Bq/kg))

(2) 塵埃吸入による内部被ばく

塵埃吸入による内部被ばく線量は, 次式で計算する。

$$D_{inh,i}(t) = C_{M,i}(0) \cdot C_d \cdot R_b \cdot t_e \cdot DF_{inh,i} \cdot \frac{1 - \exp(-\lambda_i t)}{\lambda_i t} \quad (4)$$

$D_{inh,i}(t)$: 評価期間 t 中の塵埃吸入による内部被ばく線量 (Sv/y)

C_d : 空気中ダスト濃度 (kg/m³)

R_b : 呼吸率 (m³/h)

$DF_{inh,i}$: 塵埃吸入による内部被ばく線量換算係数 (Sv/Bq)

(3) 経口摂取による内部被ばく

経口摂取による内部被ばく線量は、次式で計算する。

$$D_{ing,i}(t) = C_{M,i}(0) \cdot Q_r \cdot t_e \cdot DF_{ing,i} \cdot \frac{1 - \exp(-\lambda_i t)}{\lambda_i t} \quad (5)$$

$D_{ing,i}(t)$: 評価期間 t 中の経口摂取による内部被ばく線量 (Sv/y)

Q_r : 剥離性汚染の経口摂取率 (kg/h)

$DF_{ing,i}$: 経口摂取による内部被ばく線量換算係数 (Sv/Bq)

(4) 農作物摂取による被ばく

木質チップの堆肥への再利用では、堆肥を使用した畑で耕作したさまざまな種類の農作物を摂取することによって被ばくが起こりうる。農作物摂取による内部被ばく線量は、次式で計算する。

$$D_{ing,i}(t) = \sum_v C_{M,i}(0) \cdot TF_{v,i} \cdot Q_v \cdot G_v \cdot DF_{ing,i} \cdot \frac{1 - \exp(-\lambda_i t)}{\lambda_i t} \cdot \exp(-\lambda_i t_v) \quad (6)$$

$D_{ing,i}(t)$: 評価期間 t 中の農作物の経口摂取による内部被ばく線量 (Sv/y)

v : 農作物の種類

$TF_{v,i}$: 土壌から農作物 v への移行係数 ((Bq/kg)/(Bq/kg))

Q_v : 農作物 v の年間摂取量 (kg/y)

G_v : 農作物 v の市場係数 (-)

t_v : 農作物 v の輸送時間 (-)

(5) バイオマス発電所からの排気に係わる被ばく評価モデル

木質チップのバイオマス発電への利用では、木質チップの焼却に伴って排気塔から放出された核種の大気中への拡散による被ばくが起こりうる。そのときの空気中の核種 i の濃度 $C_{a,i}(t)$ (Bq/m³) は、以下のように表される。

$$C_{a,i}(t) = \chi \cdot f_i \cdot R \cdot MR \cdot C_i(t)$$

χ : 大気中での分散係数 (s/m³)

f_i : 核種 i の排気塔から放出される割合 (-)

R : 焼却処理能力 (kg/s)

MR : 焼却時の汚染した木質チップ混合割合 (-)

大気中に拡散した核種が沈着することによる、核種 i の土壌表面密度 $C_{g,i}(t)$ (Bq/m²) は、以下のように表される。

$$C_{g,i}(t) = V_{g,i} \cdot f_s \cdot f_r \cdot C_{a,i}(t) \cdot t \quad (8)$$

$V_{g,i}$: 核種 i の沈着速度 (m/y)

f_s : ダストの地表面への沈着割合 (-)

f_r : 沈着した核種の内残存する割合 (-)

放出した核種を含むブルームや、それが付着した土壌からの外部被ばく・内部被ばくは、再利用シナリオの外部被ばく・内部被ばくの評価式において、 C_i を $C_{a,i}$ 、 $C_{g,i}$ に置きかえて計算することで求められる。

また、汚染された木質チップを使用するバイオマス発電施設周辺で栽培されている農作物を摂取することによる被ばくが起こり得る。周辺で栽培されている農作物への汚染は、焼却に伴い排気塔から放出される核種が農作物の表面に付着すること、及び、それらが栽培されている土壌に付着した核種が農作物へ移行することで起こる。農作物中の核種 i の濃度 $C_{v,i}(t)$ (Bq/kg) を、以下のように表す。

$$C_{v,i}(t) = \left[\frac{C_{g,i}(t) \cdot TF_{v,i} \cdot f_i}{P} + V_g \cdot C_{a,i}(t) \cdot \frac{f_v \cdot f_e}{Y_B} + t_i \right] \cdot f_d \quad (9)$$

P : 土壌実効表面密度 (kg/m²)

f_v : 核種の農作物表面への沈着割合 (-)

f_e : 農作物表面へ沈着した核種の可食部への移行割合 (-)

Y_B : 農作物の栽培密度 (kg/m²)

f_i : 農作物の栽培期間年間比 (-)

t_i : 農作物の栽培期間 (y)

f_d : 調理前洗浄等による粒子状物質の残留比 (-)

農作物摂取による内部被ばく線量を、次式で定義する。

$$D_{ing,i}(t) = \frac{1}{t} \int_{t_0}^{t_0+t} dt' C_{v,i}(t') \cdot Q_v \cdot G_v \cdot DF_{ing,i} \cdot \exp(-\lambda_i t_v) \quad (10)$$

(10) 式で定義した焼却シナリオにおける農作物摂取による内部被ばく線量は、 $t_0 = 0$ から評価期間 $t = 1$ 年の間がもっとも高い年間被ばく線量になるとは限らないため、 $t_0 = 0$ から経時変化させ、Cs-134 と Cs-137 に対する被ばく線量の合計がもっとも高くなるときの年間被ばく線量を求める。

また、汚染された農作物を飼料として育てられた畜産物を摂取することによる被ばくが起り得る。そのような畜産物中の核種 i の濃度を、以下のように表す。

$$C_{n,i}(t) = C_{v,i}(t) \cdot TF_{vn,i} \cdot MR \cdot Q_{vn} \quad (11)$$

$TF_{vn,i}$: 飼料から畜産物への移行係数 (d/kg または d/L)

MR : 放射性核種を含む飼料の混合割合 (-)

Q_{vn} : 家畜の飼料摂取量 (kg-dry/d)

畜産物摂取による内部被ばく線量を、次式で定義する。

$$D_{ing,i}(t) = \sum_n \frac{1}{t} \int_{t_0}^{t_0+t} dt' C_{n,i}(t') \cdot Q_n \cdot G_n \cdot DF_{ing,i} \cdot \exp(-\lambda_i t_n) \quad (12)$$

n : 畜産物の種類

Q_n : 畜産物 n の年間摂取量 (kg/y または L/y)

G_n : 畜産物 n の市場係数 (-)

t_n : 畜産物 n の輸送時間 (y)

焼却シナリオにおける畜産物摂取による内部被ばく線量についても、農作物摂取と同様に $t_0 = 0$ から経時変化させてもっとも高い年間被ばく線量を求める。

高井 静霞 (たかい しずか)

東北大学大学院物理学専攻修士課程修了後、(独)日本原子力研究開発機構に入所。現在の所属は安全研究センター環境影響評価研究グループ。1F 事故により汚染した廃棄物の再利用に係る線量評価、地層処分の安全評価 (地下水流動解析) に関する研究に従事。

takai.shizuka@jaea.go.jp