

Ⅱ 農産物と食品の加工・調理における 放射性セシウムの動態

1. はじめに

平成 23 年 3 月の東京電力福島第一原子力発電所事故により放出された大量の放射性物質は周辺の土壌や海洋へ拡散され、これらの放射性物質によって農畜産物が汚染される事態となった。これを機にわが国では、国内産の食品を対象にした放射性物質のモニタリング検査とその管理が実施されている。

原発事故以前は、国内産食品の放射性物質汚染はないという前提から、輸入食品のみを対象に 370 Bq/kg（セシウム (Cs)-134 と Cs-137 の濃度の合算値）という暫定限度値が設定されていた¹⁾が、事故後は平成 23 年 3 月 17 日に暫定規制値（野菜類・穀類・肉・卵・魚・その他で 500 Bq/kg）が²⁾、平成 24 年 4 月 1 日からは暫定規制値に代わり新たに基準値（一般食品で 100 Bq/kg）が設定され、現在はこの基準値を基にモニタリングが実施されている³⁾。基準値は、環境中に放出された放射性物質のうち長期的な影響を考慮する必要がある核種（Cs-134, Cs-137, ストロンチウム (Sr)-90, ルテニウム (Ru)-106, プルトニウム (Pu)）を対象に設定されている。セシウム以外の核種は測定に時間がかかることから、セシウム以外の核種による影響も含めた上で、放射性セシウム濃度を用いた基準値が設定されており、放射性セシウムの濃度を測定することにより対象核種すべての影響を判断できる仕組みになっている⁴⁾。

国内食品を対象とした食品中の放射性物質検査は、原子力対策本部が定めた「検査計画、出荷制限等の品目・区域の設定・解除の考え方」（平成 25 年 3 月 19 日改正）を踏まえ、厚生労働省が示した「地方自治体の検査計画」に基づき各都道府県で実施されている⁵⁾。検査結果はすべて公表され、基準値を超過した品目については、食品衛生法に基づき同一ロットのものすべてが回収・廃棄されている。また、基準値の超過に地域的な広がりが確認された場合は出荷制限が、さらに著しく高濃度の放射性セシウム濃度が検出された場合は摂取制限が、原子力災害対策特別措置法に基づき要請される⁶⁾。このようにして、国内産食品中の放射性物質は検査・管理されている。

放射性物質を摂取することによる影響を評価する場合、摂取する食品に含まれる放射性物質濃度は、加工・調理前の原材料の値が一般的に用いられている¹⁾。しかし、実際に摂取するのは加工・調理された食品であることから、より正確な影響評価のためには、加工・調理における放射性物質の挙動を把握する必要がある。また、加工・調理された食品だけでなく加工食品製造の副産物を利用する事業者にとっては、副産物の濃度を知ることは製品管理において最も重要なことのひとつであるため、最終産物だけでなく加工・調理工程での放射性セシウムの動

態についての情報も必要である。

これまでの食品中の放射性物質の動態に関する情報としては、国際原子力機関（IAEA）により IAEA Technical Document No. 1616²⁾ において食品の加工・調理に関する情報がまとめられている。国内では 1994 年に財団法人原子力環境整備センター（現 公益財団法人 原子力環境整備促進・資金管理センター）により「食品の調理・加工による放射性核種の除去率」が刊行されており、大気核実験によって拡散した放射性核種（Sr-90, Cs-137）及び、チェルノブイリ原発事故による放射性核種（Sr-90, Ru-106, ヨウ素(I)-131, Cs-134, Cs-137）を含む食品を用いた加工・調理工程での放射性物質の除去率がまとめられている。しかしながら、日本特有の食品・食材やその加工・調理による放射性物質の詳細な動態に関するデータはほとんど蓄積されておらず、2011 年の原発事故後の状況に十分に対応することができなかった¹⁾。

原発事故直後より、放射性物質の食品への影響について、食品企業や消費者からの問い合わせが急増したことから、また放射性物質の影響が長期間に渡ることが予想されたことから、食品総合研究所では 2011 年 3 月 25 日に放射性物質影響ワーキンググループを組織し、(1) 食品と放射性物質に関する情報の発信、(2) 国からの要請による迅速な研究活動、(3) 国内および世界に発信すべき基礎的研究の推進について活動している。本稿では、これまでに著者らワーキンググループが取り組んできた「食品の加工・調理工程における放射性セシウムの動態解析」について、穀類を中心とした農産物（麦類、大豆、米）を原料とした食品の加工・調理工程での放射性セシウムの動態について述べる。

2. 加工・調理による放射性セシウムの動態解析

2.1 麦類の加工・調理における放射性セシウムの動態

2.1.1 製粉・製麦

麦類の放射性物質検査は玄麦で行われているが、玄麦小麦は製粉加工により小麦粉とふすまに分離され、玄麦大麦は精麦加工により精白麦と麦ぬかへと分けられ利用されている。小麦の国内総需要量（561 万トン、2012 年）に占める国内産小麦の割合は約 13 %（73 万トン）であり、国産小麦粉の約 50 %はうどん等の麺類へと加工される。精白麦は麦飯として食するほか醸造用としても利用されている。ふすまや麦ぬかも、良質のたんぱく質を含み食物繊維含有量も高いことから配合飼料の原料や肥料としての需要が高い。

被災地域の秋まき小麦は、原発事故発生時には 6-8 葉期であったため、フォールアウトした放射性物質の葉面或いは、根からの吸収による穀粒への汚染が懸念された。6 月の収穫期においては、I-131（半減期 8 日）は放射能が事故当初の 1/3000 - 1/5000 に減少しており、より半減期の長い放射性セシウム（Cs-134 と Cs-137 の半減期はそれぞれ 2 年と 30 年）による汚染が問題であった。そこで、

汚染レベルの異なる 2011 年産の玄米を用いた小麦粉とふすまへの小麦製粉加工及び、精白麦と麦ぬかへの大麦精麦加工における放射性セシウム (Cs-134 と Cs-137 の濃度の合算値) の分配を調べ、加工による各分画の濃度変化 (加工係数) を算出した³⁾。結果を図 1 に示す。

製粉加工、および精麦加工のいずれにおいても、玄麦とその加工品である小麦粉とふすま、または精白麦と麦ぬかの間には放射性セシウム濃度 (Bq/kg , 新鮮重) の高い相関関係が認められた。つまり、加工による各分画 (小麦粉とふすま、または精白麦と麦ぬか) への放射性セシウムの分配割合は、玄麦の放射性セシウム濃度に関わらずほぼ一定となった。小麦粉と精白麦の放射性セシウム濃度は玄麦と比べ低くなるのに対し、ふすまと麦ぬかの放射性セシウム濃度は玄麦に比べ高くなった。加工による放射性セシウム濃度の変化を割合で示すパラメータとして加工係数 (加工後の放射性セシウム濃度 (Bq/kg , 新鮮重) / 加工前の放射性セシウム濃度 (Bq/kg , 新鮮重)) が用いられるが、汚染レベルの異なるそれぞれ的小麦粉の加工係数の平均値は 0.32 であるのに対し、ふすまの加工係数の平均値は 2.19 であった。また、精白麦の加工係数の平均値が 0.57 であるのに対し、麦ぬかの加工係数の平均値は 2.23 となった。食用となる小麦粉や精白麦の加工係数は 1 未満 (平均値の 95 % 信頼区間の上限値) となり、玄麦が基準値以下であれば、加工品である小麦粉と精白麦の放射性セシウム濃度は基準値を超えないことが明らかとなった。一方、ふすまや麦ぬかの加工係数の平均値は 2 以上 3 未満 (95 % 信頼区間) となり、加工により玄麦の放射性セシウム濃度の 2 倍以上の濃度となることが分かった。そのため、玄麦の放射性セシウム濃度が基準値

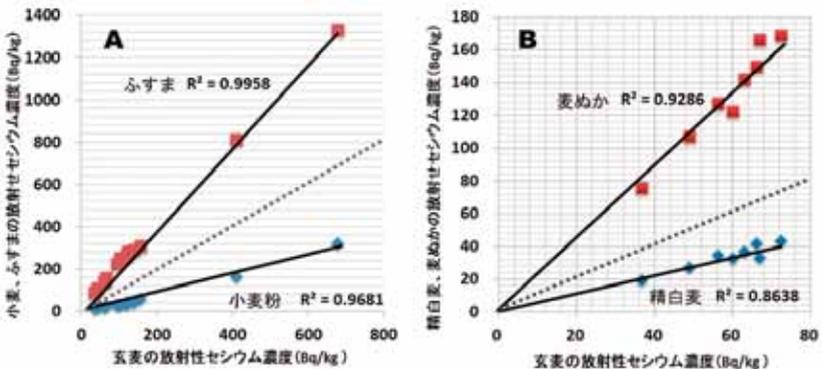


図 1 小麦製粉加工 (A) と大麦精麦加工 (B) における原料玄麦と加工品の放射性セシウム濃度の相関関係。破線は、加工の前後で濃度変化がない場合 (加工係数 1) を示す。

A : ■ (赤) はふすま, ■ (青) は小麦粉を示す。

B : ■ (赤) は麦ぬか, ■ (青) は精白麦を示す。

未満であっても、加工後のふすまや麦ぬかの濃度が飼料の暫定許容値（牛・馬用飼料 100 Bq/kg, 豚用飼料 80 Bq/kg, 家きん用飼料 160 Bq/kg, 養殖魚用飼料 40 Bq/kg）を越える場合が想定される。よって農林水産省は、飼料からの肉、乳、卵において基準値を超過しないよう安全性を確保し、円滑な国産麦の流通や飼料への利用を行うため、本解析データを踏まえ、麦のふすま・麦ぬかの加工係数を 3 として扱うように通知を行った（「平成 23 年産麦に由来するふすま及び麦ぬかの取り扱いについて」23 消安第 3224 号, 23 生産第 4499 号, 23 水産第 545 号, 平成 23 年 9 月 13 日通知）。加工係数が設定されると、玄麦の放射性セシウム濃度から、ふすまや麦ぬかの濃度を予測することが可能となるため、食料や飼料の原料取引における重要な参考情報として用いられている。また、小麦については加工品である小麦粉とふすまにおける放射性セシウムの分布割合を算出した。玄麦小麦に含まれる放射性セシウム量 (Bq) を 100 % とした場合、外皮であるふすまに約 80 %, 胚乳粉である小麦粉に約 20 % が分布していた。

2.1.2 うどん・中華麺の調理

小麦粉の種類は、タンパク質の含量によって薄力粉, 中力粉, 強力粉等に分類される。国産の小麦粉はうどんなどの日本麺としての適性が高く、国産小麦の約 50% がうどんやそうめんなどの日本麺へと加工されている。また、うどんと同様に国内で人気があるのが中華麺である。うどんは小麦粉に塩を加えて加工されるが、中華麺は塩の代わりにアルカリ性のかんすいを用いる。かんすいの使用により麺に独特の色と風味、および食感をもたらされ、ラーメンの麺や焼きそば用の麺として幅広く食されている。そこで、国産原料での利用が多いうどんと、日本で特に人気の高い中華麺について、茹で麺の放射性セシウムの加工係数（茹で麺中の食品中の放射性セシウム濃度 (Bq/kg, 新鮮重) / 生麺中の食品中の放射性セシウム濃度 (Bq/kg, 新鮮重)）と残存割合（茹で麺中の食品中の放射性セシウム量 (Bq) / 生麺中の食品中の放射性セシウム量 (Bq) × 100, %）を算出した^{3)~5)}。

うどん (3 mm × 2.5 mm × 25 cm) は、放射性セシウムを含む小麦粉 100 に対して、食塩 2, エタノール 2, 水 32 を加えて調製した。うどんの調理は、小麦のめん適性評価法⁶⁾の茹で方法に従い、生麺質量に対し 10 倍量の沸騰水で、麺の水分含量がおおよそ 75 % 程度になるまで茹でた後、生麺質量に対し 10 倍量の水で 30 秒間水洗したものを茹で麺とした。生麺, 茹で湯, すすぎ水, 茹で麺における加工係数と残存割合を表 1 に示す。

うどんの茹で調理による茹で麺の加工係数は 0.07 となり、茹で麺の放射性セシウム濃度は生麺の 1/10 以下となった。また、茹で麺への放射性セシウムの残存割合は 15 % となり、茹で調理により麺に含まれる放射性セシウムの 85 % が茹で麺から除去されていた。このことから、玄麦の放射性セシウム濃度が基準値と

同じ 100 Bq/kg であった場合、小麦粉に加工されると約 32 Bq/kg（小麦粉の加工係数は 0.32, 2.1.1 製粉・製麦）となり、さらに製麺後、茹で調理されることにより実際に食べる状態の茹で麺の濃度は 3 Bq/kg 以下（うどんの加工係数は 0.07）になると予測されることから、玄麦が基準値以下の濃度であれば、うどん茹で麺の放射性セシウム濃度は基準値を十分に下回ることが確認された³⁾。また、国内のうどんは麺の太さが様々であり、茹で時間も個人の嗜好によって異なるため、麺の太さと茹で時間が放射性セシウムの動態に及ぼす影響も検討した。一般的なうどんの太さの麺（太麺；3 mm × 2.5 mm × 25 cm）と、そうめん程度の太さの麺（細麺；1.5 mm × 1.5 mm × 25 cm）を茹で時間を変えて調理した場合の放射性セシウムの動態を調べたところ、太麺、細麺ともに、喫食に適した茹で時間において、茹で麺の濃度は茹でる前の 1/10 以下となり、茹で麺から茹でる前の 80 % 以上の放射性セシウムが除去されていた。さらに、喫食に適した茹で時間以上に茹で時間を延長しても、放射性セシウムの有意な低減効果は得られないことも明らかとなった（表 2）。これらのことから、うどんは喫食に適した茹で調理を行うことで、麺の太さに関わらず 80 % 以上の除去効果があることが示された⁴⁾。

表 1 うどん調理における放射性セシウムの動態

	生麺	茹で湯	すすぎ水	茹で麺
加工係数	1.00	—	—	0.07
残存割合 (%) [*]	100	85	10	15

^{*} 茹で湯, すすぎ水, 茹で麺の残存割合の合計が 110 となるのは実験上の誤差である。

表 2 麺の太さと茹で時間の違いがうどん調理における放射性セシウムの動態に及ぼす影響

太麺 (3mm × 2.5mm)	茹で時間 (分)				
	10	20 ^{*1}	30	40	
加工係数	0.094 ^a	0.061 ^b	0.060 ^b	0.062 ^b	
残存割合 (%)	19 ^a	15 ^a	18 ^a	20 ^a	
細麺 (1.5mm × 2.5mm)	茹で時間 (分)				
	1.5	3 ^{*2}	4.5 ^{*2}	6	10
加工係数	0.15 ^a	0.084 ^b	0.057 ^c	0.045 ^c	0.049 ^c
残存割合 (%)	29 ^a	18 ^b	14 ^{bc}	12 ^c	15 ^{bc}

各麺において加工係数ごと、残存割合ごとに Tukey の多重比較検定を行った。異なるアルファベットは有意差があることを示す。

^{*} 1：太麺の最適な茹で時間を示す。

^{*} 2：細麺の最適な茹で時間を示す。

表3 中華めん調理における放射性セシウム動態

		生麺	茹で湯	茹で麺
中華めん (かんすい使用)	加工係数	1.00	—	0.26
	残存割合 (%)*	100	47	46
食塩麺 (食塩使用)	加工係数	1.00	—	0.17
	残存割合 (%)*	100	67	32

* 茹で湯，茹で麺の残存割合の合計が100にならないのは実験上の誤差である。

中華麺は(1.5 mm × 1.5 mm × 25 cm)，放射性セシウムを含む小麦粉 100 に対して，粉末状かんすい(炭酸カルシウム 60 % (w/w)，炭酸ナトリウム 40 % (w/w)) 1.3，エタノール 2，水 31 を加えて調製した。中華麺の調理もまた，小麦のめん適性評価法⁶⁾の茹で方法に従った。生麺質量に対し 10 倍量の沸騰水で，茹で麺質量が生麺質量の約 1.8 倍程度となるまで茹でたものを茹で麺とした。生麺，茹で湯，茹で麺における加工係数と残存割合を表 3 に示す。

中華麺の茹で調理による茹で麺の加工係数は 0.26 となり，茹で麺の放射性セシウム濃度は生麺の約 1/4 程度となった。また，茹で麺への放射性セシウムの残存割合は 46 % となり，茹で調理により麺に含まれる放射性セシウムの 54 % が茹で麺から除去されていた。前項のうどん茹で麺の加工係数 (0.07) や残存割合 (0.15) と比較すると，中華麺の加工係数と残存割合は高く，茹で調理による放射性セシウムの低減効果はうどんよりも小さいことが示唆された。かんすいの代わりに同量の食塩を用いて調整した食塩麺では，茹で麺への放射性セシウムの残存割合が 32 % となり，かんすいを使用した場合より残存割合が有意に低かった ($p < 0.01$)。これらのことから，中華麺の茹で調理における放射性セシウムの動態には，かんすいの使用による麺の物性の変化や，麺生地がアルカリ性になっていることが影響を及ぼしている可能性が示唆された。本研究のデータを用いると，放射性セシウム濃度 100 Bq/kg の玄麦を用いても，小麦粉に加工されると約 32 Bq/kg (小麦粉の加工係数は 0.32，2.1.1 製粉・製麦)，さらに中華麺に製麺後茹で調理されると 8.3 Bq/kg (中華麺の加工係数は 0.26) となり，私たちが食する状態の茹で中華麺の濃度は基準値を十分に下回ることが確認された。

2.1.3 麦茶 (焙煎・浸出)

麦茶は焙煎した大麦の種子を煮出した飲料である。飲料水の放射性セシウムの基準値は 10 Bq/kg と設定されており，直接飲用する水，調理に使用する水，及び水との代替関係が強い飲用茶に対して適用されている^{iv)}。しかし麦茶に対して

は、原料である焙煎前の玄麦大麦に対して一般食品の基準値 100 Bq/kg が適用されている。麦茶の標準的製法⁷⁾は、水 1.5 L に対して焙煎大麦 50 g を加えて強火で加熱、沸騰したら加熱を停止し、5 分間常温で放置したものをろ過するとされている。焙煎大麦の質量に対して 30 倍量の水で煮出すことから、基準値以下 (100 Bq/kg 以下) の玄麦大麦を使用した麦茶は、飲用水の基準値 (10 Bq/kg) を超過することはないと考えられる。しかし、実際のデータが存在しないため、麦茶の加工 (焙煎麦からの浸出) による放射性セシウムの加工係数 (麦茶の放射性セシウム濃度 (Bq/kg, 新鮮重) / 焙煎大麦の放射性セシウム濃度 (Bq/kg, 新鮮重)) と焙煎大麦から麦茶への放射性セシウムの移行割合 (麦茶中の食品中の放射性セシウム量 (Bq) / 焙煎大麦中の放射性セシウム量 (Bq) × 100, %) を算出した⁸⁾。

大麦の放射性セシウムの濃度は、焙煎加工 (210 °C, 60 分) により 119 Bq/kg から 138 Bq/kg へと増加し、加工係数は 1.16 となった。この時の水分含量は 12.5 % から 0.3 % に減少していた。放射性セシウム濃度に質量を乗じた放射性セシウム量 (Bq) を焙煎加工の前後で比較するとほぼ等しかった (データ未掲載) ことから、濃度の増加は水分量の減少に起因するものであり、焙煎加工による放射性セシウムの揮散はないと考えられた。日本食品標準成分表 2010⁷⁾ における麦茶の可溶性固形分値 (Brix %) は 0.3 % となっているが、可溶性固形成分の浸出や麦茶の色調は、原料の焙煎状態や玄麦大麦の状態にも影響されることから、5, 60, 120 分の浸出時間において放射性セシウムの動態を調べた。結果を表 4 に示す。

可溶性固形分値は、浸出時間 5 分で 0.045 %, 60 分で 0.532 % となり、60 分以上の浸出時間であれば標準的な麦茶と比べて十分な浸出が行われていると判断された。焙煎大麦から麦茶への加工係数は、60 分で 0.0109, 120 分の浸出時間でも 0.0133 となり、原料に 100 Bq/kg の大麦を使用し 120 分間浸出したとしても、焙煎大麦の濃度が 116 Bq/kg (加工係数 1.16)、最終産物の麦茶の濃度は 1.5 Bq/kg (120 分間浸出の加工係数 0.013, 116 Bq/kg × 0.013 ≒ 1.5 Bq/kg) と予測される。このことから、原料の玄麦大麦が基準値以下の濃度であれば、麦茶の放射性セシウム濃度は基準値以下になることが確認された。また、各浸出時間にお

表 4 焙煎麦から麦茶への放射性セシウムの加工係数と移行割合

浸出時間 (min)	Brix (%)*	加工係数	移行割合 (%)
5	0.045	0.0053	15
60	0.532	0.0109	31
120	0.787	0.0133	38

* 可溶性固形分。

る放射性セシウムの移行割合は60分の浸出時間で31%、120分においても38%であり、麦茶中へ浸出するよりも麦茶浸出残渣へ残る放射性セシウムの割合のほうが大きいことが分かった。

2.2 大豆の加工・調理における放射性セシウムの動態

大豆は米・小麦に次ぐ主要な穀物であり、食用のみならず、油糧用、飼料、種子等に利用されている。国内大豆需要量(304万t)のうち食用に利用される食用大豆は需要量の約31%(94万t)である。食用大豆に占める国産大豆の割合は約24%(23万t)であり、国産大豆の約90%が加工・調理された状態で消費されている。国産大豆の用途の内訳は、豆腐60%、納豆12%、煮豆・総菜9%、味噌・醤油9%、その他(きな粉、お菓子等)9%となっている⁹⁾。そこで、国産大豆が加工・調理される割合が高い豆腐、納豆、煮豆について、放射性セシウムの加工係数(加工後の食品中の放射性セシウム濃度(Bq/kg, 新鮮重)/加工前の食品中の放射性セシウム濃度(Bq/kg, 新鮮重))と残存割合(加工後の食品中の放射性セシウム量(Bq)/加工前の食品中の放射性セシウム量(Bq)×100,%)を算出した⁹⁾。

2.2.1 豆腐加工

豆腐は大豆の搾り液である豆乳を凝固させた加工食品である。凝固剤添加後の製造工程の違いにより、木綿豆腐、絹ごし豆腐、充填豆腐に分けられる。木綿豆腐や絹ごし豆腐は、型枠から出した後に水槽に取り出し水晒しを行うため、豆腐中の放射性セシウムが水中へ移行する可能性が考えられるが、充填豆腐は凝固剤を添加後、容器に充填・密封し凝固させ水晒しを行わない。このことから、より安全側に放射性セシウムの動態を見積もるために充填豆腐の加工工程における放射性セシウムの動態を検討した。

大豆1.5kgを0.65kgの蒸留水で3回洗浄後、洗浄水を除去し全体質量が7.5kgとなるように蒸留水を加え、20℃で18時間浸漬し膨潤させた。浸漬水を除去後、全体質量が10.5kgとなるように大豆に蒸留水を加え、フードプロセッサで磨砕した状態の呉を得た。呉に消泡剤(1%)を加え3分間煮沸後、蒸発した水分を補充し、豆腐製造用のナイロンメッシュろ過袋で絞った。ろ過した液を豆乳、ろ過袋に残存した画分をおからとした。豆乳に塩化マグネシウム(0.25%)を添加し十分に攪拌した後、80℃で1時間加熱固化し、さらに5℃で一昼夜保存したものを豆腐とした。豆腐加工工程における放射性セシウムの加工係数(加工後の食品中の放射性セシウム濃度(Bq/kg, 新鮮重)/加工前の食品中の放射性セシウム濃度(Bq/kg, 新鮮重))と残存割合(加工後の食品中の放射性セシウム量(Bq)/加工前の食品中の放射性セシウム量(Bq)×100,%)を表5と図2に示す。

表5 豆腐・納豆・煮豆への加工・調理における放射性セシウムの加工係数

加工品名		加工係数
豆腐	おから	0.18
	豆乳	0.13
	豆腐	0.12
納豆	加圧蒸煮豆	0.40
	納豆	0.40
煮豆	—	0.20

おから、豆乳、豆腐の加工係数は、0.18、0.13、0.12となり、原料大豆の放射性セシウム濃度が100 Bq/kgであった場合、おから、豆乳、豆腐の濃度はそれぞれ18 Bq/kg、13 Bq/kg、12 Bq/kgとなった。豆腐への加工により、原料大豆の濃度より低くなることがわかった。また、原料大豆に含まれる放射性セシウム量の30%がおからに、67%が豆乳に残存した。豆腐の残存割合は67%であり、豆乳から豆腐への加工による放射性セシウムの低減効果はなかった。しかしながら、木綿豆腐や絹ごし豆腐では水晒しの工程があることから、豆乳から豆腐への加工工程において充填豆腐よりも放射性セシウムが低減されると考えられる。

2.2.2 納豆加工

一般的に販売されているポリスチレン容器に入った納豆の加工工程における放射性セシウムの動態を検討した。洗浄後、20℃で16時間浸漬した大豆を0.18–0.20 MPa、131–133℃にて30分間加圧蒸煮し蒸煮大豆を得た。納豆菌胞子を蒸煮大豆1gあたり1000個となるように接種した後、納豆発酵用ポリスチレン容器に充填し18時間、39℃で発酵させて納豆とした¹⁰⁾。納豆加工における放射性セシウムの加工係数と残存割合を表5と図2に示す。

納豆の加工係数は0.40となった。原料大豆の放射性セシウム濃度が100 Bq/kgであった場合、納豆の放射性セシウム濃度は40 Bq/kgとなり、納豆への加工により放射性セシウム濃度が基準値を上回らないことが示された。また、納豆菌胞子の接種前の蒸煮大豆の加工係数も0.4であり、発酵工程の前後で放射性セシウム濃度が変化しないことが分かった。残存割合を調べると、蒸煮工程において大豆から蒸煮排水へ17%の放射性セシウムが移行しており、蒸煮大豆の残存割合は67%、発酵後の納豆は65%が残存していた。このことから発酵工程による放射性セシウムの低減効果がないことが示された。

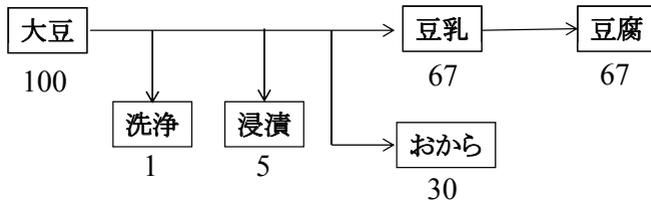
2.2.3 煮豆調理

煮豆は醤油と砂糖を加えて調理される方法で製造した⁹⁾。1kgの原料大豆を

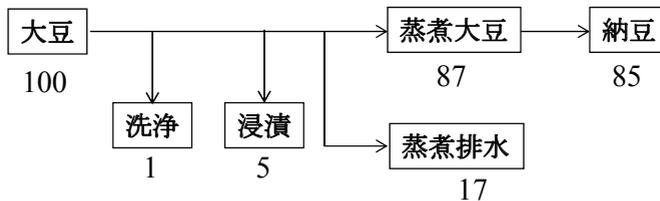
洗浄後、3 kg の蒸留水で浸漬した。浸漬水を除去し、全体質量が 4 kg となるように蒸留水を加え、2 時間穏やかに煮沸した。砂糖 350 g と醤油 150 ml を加え、さらに 15 分煮沸して煮豆を得た。煮豆の加工係数は 0.20 となり、原料大豆の放射性セシウム濃度が 100 Bq/kg であった場合、煮豆の放射性セシウム濃度は 20 Bq/kg となり、原料大豆の放射性セシウム濃度が基準値以下で管理されていれば、煮豆の放射性セシウム濃度が基準値を上回らないことが示された。また、煮豆への放射性セシウムの残存割合は 45 % であり (表 5)、放射性セシウムの 45 % が大豆から煮汁へと移行していた (図 2)。

食品中のセシウムの挙動と類似した元素にカリウムがある。カリウムを放射性セシウムの指標として利用した野外調査研究がいくつか報告されており^{11) 12)}、実

A. 豆腐加工工程での放射性セシウムの残存割合 (%)



B. 納豆加工工程での放射性セシウムの残存割合 (%)



C. 煮豆調理工程での放射性セシウムの残存割合 (%)

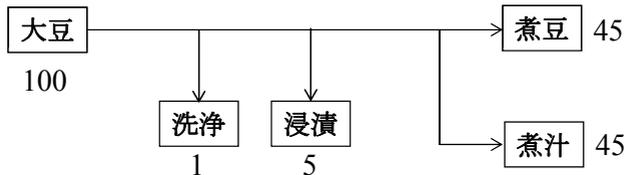


図 2 豆腐・納豆・煮豆の製造工程での放射性セシウムの残存割合

際にカリウムの除去率がセシウムの除去率の目安として利用できる場合があることが示唆されている¹⁾。日本食品標準成分表 2010⁷⁾ に示された数値から間接的にみれば、豆腐、納豆、煮豆のカリウムの加工係数を求めると、それぞれ 0.12, 0.07, 0.35, 0.17 となり、今回算出した放射性セシウムの加工係数とほぼ同程度の値となったことから、大豆の加工・調理においても、安定性カリウムが放射性セシウムの指標と成り得るかもしれない。

2.3 米の加工・調理における放射性セシウムの動態

2.3.1 精米加工・炊飯

米は国民の主食であり、一人当たりの摂取量が多く、野菜等の他の品目と比べ生産量が多い。また、生産農家数も極めて多く、麦と異なり農家による直接販売等を含め多様な流通形態にある。そのため、作付制限や他品目より濃密な放射性物質検査を行うことで、基準値を超過した米を流通させないような取り組みが行われている。平成 23 年産米の放射性物質検査は、検査件数 26,464 件のうち基準値を超過したものは 592 件であり、全体の約 2.2 % となったが、平成 24 年産米では、作付制限や吸収抑制対策および出荷後の検査を組み合わせた安全確保のための取り組みが実施され、検査件数 1,032 万件のうち基準値超過は 84 件（全体の 0.0008 %）となり、平成 23 年産と比べて基準値を超過した米は極めてわずかな発生割合となった^{vi)}。米の放射性物質検査は玄米の状態で行われている。玄米に含まれる放射性セシウムは、ご飯として食べる胚乳よりも、ぬか層に多く分布していることがすでに知られており¹³⁾、福島第一原子力発電所事故由来の放射性物質を含む玄米についても、精白米（精米歩合 90 %、玄米に対する精米の質量比）にすると放射性セシウム濃度が玄米の約 40 % に低減されると報告されている¹⁴⁾。

精米加工では、玄米の表面を覆っている果皮や種皮、糊粉層までのぬか層が取り除かれる。ぬか層は玄米質量の約 8 % を占めており、ほぼ完全にぬか層を除去したものを精白米（十分づき）と呼ぶ。ぬか層にはビタミンやミネラル、食物繊維等が含まれており栄養価が高いことから、ぬか層を完全に除去しない七分づき米（精米歩合 93 - 94 %）や五分づき米（精米歩合 95 - 96 %）で食される場合もある。放射性セシウム濃度の異なる 2 種類の玄米において、精米歩合を変化させた場合の加工係数と、精米とぬか層における放射性セシウムの残存割合の変化を調べた（表 6, 7）。

精米中の放射性セシウム濃度は、ぬか層が削られ精白米へと近づくに伴い減少する傾向にあり、精白米の放射性セシウム濃度は玄米の約 1/2（加工係数 0.47 - 0.48）に低減されていた。精米中の残存割合もまた、ぬか層が削られるに伴い減少し、精白米にすると約 40 % が胚乳に残存し、ぬか層に 60 % の放射性セシウムが存在することが確認された。

一方、ぬか層に含まれる放射性セシウム濃度は、精米度合に関わらず玄米の 6.5 - 7.8 倍（加工係数 6.5 - 7.8）となり、製粉・製麦におけるふすまや麦ぬかと

表6 精米加工における放射性セシウムの加工係数

試料*	部位	加工係数				
		玄米	3分づき	5分づき	7分づき	10分づき
試料A	精米	1	0.81	0.68	0.61	0.48
	ぬか	1	7.2	7.5	7.8	7.1
試料B	精米	1	0.81	0.72	0.55	0.47
	ぬか	1	6.6	7.0	6.9	6.5

* 試料 A, B の放射性セシウム濃度は異なっている。

表7 精米過程の違いによる精米とぬかの放射性セシウムの残存割合

試料	残存割合 (%)				
	玄米	3分づき	5分づき	7分づき	10分づき
精米	100	78.9	64.3	58.3	43.5
ぬか	0	21.8	88.6	46.3	60.1

同様に、加工により放射性セシウム濃度が高くなることから、利用する際には、その用途に応じて食品衛生上の基準値、肥料・土壌改良資材・培土及び試料の暫定許容値、またはきのこ菌床用培地の指標値に留意して、各値を超過しない様に取り扱う必要がある。農林水産省は「平成23年産米に由来する米ぬか等の取り扱いについて」(23生産第5304号, 23消安第4796号, 23食産第2291号, 23林政経第262号, 23水推第832号, 平成23年12月19日通知)で、米ぬかの加工係数を8としており、これは今回の結果と比べてより安全側に設定された値となっていることがわかる。

さらに、精白米を炊飯した場合の放射性セシウムの動態を調べた。800 ml の水で5回洗米し、一般的なIH炊飯器を用いて炊飯した。精白米に含まれる放射性セシウムの約35%が洗米により洗米水へと移行することにより除去され、炊飯米には約65%の放射性セシウムが残存していた。炊飯には水を添加するため、炊飯米の放射性セシウム濃度は精白米の約1/3(加工係数0.28)に低下することがわかった(データ省略)。

これらの結果より、玄米の放射性セシウム濃度が100 Bq/kg だった場合、精白米へと加工することにより濃度は48 Bq/kg(加工係数0.48)、さらに炊飯により放射性セシウム濃度は13 Bq/kg(加工係数0.28)となり、玄米が基準値以下で管理されていれば、炊飯米の放射性セシウム濃度が基準値を上回らないことが確認された。

3. おわりに

原子力発電所事故後から始まった食品に含まれる放射性物質の動態解析についての取り組みは4年目を迎えようとしている。いまだ解明されていない点は多く、今後も調査・研究を行う必要があるが、これまでの研究活動で明らかにした放射性セシウムの動態に関する情報が、食品に含まれる放射性セシウム濃度を正確に知りたいと願う消費者を含め、フードチェーンに携わるすべての方々にとって役に立つ情報となれば幸いである。

謝 辞

大豆の加工・調理における放射性セシウムの動態解析については、公益財団法人すかいらーくフードサイエンス研究所の研究助成事業によって実施されたものである。

(食品安全研究領域 放射性物質影響研究コーディネーター室 八戸真弓)

文 献

- 1) (公財)原子力環境整備促進・資金管理センター, 環境パラメーター・シリーズ4増補版(2013年)食品の調理・加工による放射性核種の除去率-我が国の放射性セシウムの除去率データを中心に-, pp. 1-2 (2013).
- 2) International Atomic Energy Agency, Quantification of radionuclide transfer in terrestrial and freshwater environments for radiological assessments. IAEA TECDOC Series No. 1616, pp 577-604 (2009).
- 3) Kimura, K., Kameya, H., Nei, D., Kakihara, Y., Hagiwara, S., Okadome, H., Tanji, K., Todoriki, S., Matsukura, U., Kawamoto, S., Dynamics of radioactive cesium (^{134}Cs + ^{137}Cs) during the milling of contaminated Japanese wheat cultivars and during the cooking of udon noodles made from wheat flour., *Journal of Food Protection*, **75**, 1823-1828 (2012).
- 4) 八戸真弓, 内藤成弘, 明石肇, 等々力節子, 松倉潮, 川本伸一, 濱松潮香, うどん調理における放射性セシウムの動態解析, 日本食品科学工学会誌, **61**, 34-38 (2014).
- 5) 八戸真弓, 内藤成弘, 明石肇, 等々力節子, 松倉潮, 川本伸一, 濱松潮香, 中華麺の調理工程における放射性セシウムの動態解析, 日本食品科学工学会誌, **60**, 54-57 (2013).
- 6) 食糧庁, 国内産小麦の評価に関する研究報告会, 小麦のめん(うどん)適正評価法, pp. 27 (1997).
- 7) 文部科学省科学技術学術審議会資源調査分科会, 日本食品標準成分表 2010, pp. 430 (2010).

- 8) 等々力節子, 亀谷宏美, 内藤成弘, 木村啓太郎, 根井大介, 萩原昌司, 柿原芳輝, 美濃部彩子, 篠田有希, 水野亮子, 松倉潮, 川本伸一, 麦原料から麦茶浸出液への放射性セシウムの移行率, 日本食品科学工学会誌, **60**, 25-29 (2013).
- 9) Hachinohe, M., Kubo, Y., Tanji, K., Hamamatsu, S., Hagiwara, S., Nei, D., Kameya, H., Nakagawa, R., Matsukura, U., Todoriki, S., and Kawamoto, S., Distribution of Radioactive Cesium (¹³⁴Cs plus ¹³⁷Cs) of the Contaminated Japanese Soybean cultivar during the preparation of Tofu, Natto, and Nimame (boiled soybean). *Journal of Food Protection*, **76**, pp. 1021-1026 (2013).
- 10) Kubo, Y., Rooney, A. P., Tsukakoshi, Y., Nakagawa, R., Hasegawa, H., Kimura, K., Phylogenetic analysis of *Bacillus subtilis* strains applicable to Natto (fermented soybean) production. *Appl. and Environ. Microbiol.*, **77**, pp. 6463-6469 (2011).
- 11) Ronneau, C., L. Sombre, C. Myttenaere, P. Andre, M. Vanhouche, and J. Cara., Radiocesium and potassium behavior in forest trees. *J. Environ. Radioact.* **14**, pp. 259-268 (1991).
- 12) Sombré, L., M. Vanhouche, S. de Brouwer, C. Ronneau, J. M. Lambotte, and C. Myttenaere., Long-term radiocesium behavior in spruce and oak forests., *Sci. Total Environ.*, **157**, pp. 59-71 (1994).
- 13) (財)原子力環境整備センター, 環境パラメーター・シリーズ4 食品の調理加工による放射性加工種の除去率, pp. 76-84 (1993).
- 14) 佐藤誠, 藤村恵人, 藤田智博, 鈴木幸雄, 佐久間祐樹, 大和田正幸, 精米歩合および炊飯米の放射性セシウムの解析, 日本作物学会紀事, **81** (別号2), pp. 12-13 (2012).

引用 URL

- i) <http://www.mhlw.go.jp/houdou/0111/h1108-2.html> (2013.10.24)
- ii) http://www.mhlw.go.jp/shinsai_jouhou/shokuhin.html (2013.10.10)
- iii) <http://www.mhlw.go.jp/stf/houdou/2r9852000002xsm1.html> (2013.10.10)
- iv) <http://www.mhlw.go.jp/topics/bukyoku/iyaku/syoku-anzen/iken/dl/120117-1-03-01.pdf> (2013.10.12)
- v) http://www.maff.go.jp/j/seisan/ryutu/daizu/pdf/daizu_meguji_h2508.pdf (2013.10.15.)
- vi) http://www.maff.go.jp/j/kanbo/joho/saigai/kome_seisan_qa.html (2013.10.18)