JAEA-Research 2012-015



植物による農地土壌等における 放射性物質除去技術の開発 (共同研究)

Technical Development to Remove Radionuclides from Agricultural Soils by Plants (Joint Research)

> 山田 智 迫田 晃弘 石森 有 Satoshi YAMADA, Akihiro SAKODA and Yuu ISHIMORI

> > 人形峠環境技術センター

Ningyo-toge Environmental Engineering Center

P

日本原子力研究開発機構

July 2012

Japan Atomic Energy Agency

本レポートは独立行政法人日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。 本レポートの入手並びに著作権利用に関するお問い合わせは、下記あてにお問い合わせ下さい。 なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ホームページ(<u>http://www.jaea.go.jp</u>) より発信されています。

独立行政法人日本原子力研究開発機構 研究技術情報部 研究技術情報課
〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根2番地4
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency Inquiries about availability and/or copyright of this report should be addressed to Intellectual Resources Section, Intellectual Resources Department, Japan Atomic Energy Agency 2-4 Shirakata Shirane, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

© Japan Atomic Energy Agency, 2012

植物による農地土壌等における放射性物質除去技術の開発 (共同研究)

日本原子力研究開発機構人形峠環境技術センター

山田 智*、迫田 晃弘、石森 有

(2012年5月1日受理)

鳥取大学農学部と日本原子力研究開発機構人形峠環境技術センターは、農地土壌等における環 境修復技術開発として、植物を利用した手法(ファイトレメディエーション)について検討して いる。平成23年度は、フィールドでの実証試験に供しうる有望な植物種を2、3種程度選定する ため、必要な温度と照度を調節した環境で、水耕栽培によるスクリーニング試験を実施した。

供試植物種は、カリウムよりもナトリウムを特異的に吸収する好塩性植物を中心に選定したが、 そのほか国内で大規模試験が行われているヒマワリ等も試験した。栽培や収穫に手間のかからな いこと、回復後に農作の妨害をしないことなどに留意した。

育苗または購入した苗を基本培養液で一定期間栽培した後、試験を開始した。対照区、Cs 添加 区、Sr 添加区の3処理区を設け、安定同位体である¹³³Cs、⁸⁸Sr の試薬を利用した。吸収能を調査 するとの観点から、Cs (CsCl) および Sr (SrCl₂・6H₂0) 添加区の濃度をそれぞれ 1. 6836 mg/L (0.01 mM)、266.62 mg/L (1 mM) とした。

原則として、試験開始後2週間目に採取し、器官(茎、葉、根)毎にK、Ca、Mg、Sr、Csを測定した。試験期間を考慮して、含有率(乾燥重量あたりの量)を指標とした。

総合的に判断して、今回の試験範囲で最も適した植物種はツルナとアイスプラントであると結 論した。Cs、Sr 共に主に茎葉に集積するほか、表層近くに根を張り匍匐して株が大きくなること から、表層土壌の汚染物質除去に適している。効果的な適用には、吸収と分配の生育時期による 変化、植物の成長特性、根の分布などについてフィールドでの調査が必要である。

また、本技術開発の目的に適った植物は、対象物質を特異的に吸収して高含有率を示す植物種、 あるいは含有率は通常であっても植物のサイズが大きく面積あたりの除去率が大きい植物種であ るが、今回の試験では植物種の生育段階が必ずしも一致していないことから、フィールド試験の 際には後者の観点も含めて確認することが必要である。

これらを踏まえて、適用可能性に係る試験計画を立案した。

本研究は日本原子力研究開発機構と国立大学法人 鳥取大学農学部との共同研究に基づいて実施 したものである。

人形峠環境技術センター:〒708-0698 岡山県苫田郡鏡野町上斎原 1550

*国立大学法人 鳥取大学農学部

i

Technical Development to Remove Radionuclides from Agricultural Soils by Plants (Joint Research)

Satoshi YAMADA*, Akihiro SAKODA and Yuu ISHIMORI

Ningyo-toge Environmental Engineering Center, Japan Atomic Energy Agency Kagamino-cho, Tomata-gun, Okayama-ken

(Received May 1, 2012)

Tottori University and Japan Atomic Energy Agency started a joint study to develop an environmental remediation technique for agricultural soil. Nine plants were water-cultured and examined for screening. A few were selected as candidates for demonstrations in fields.

Preselected plants were mainly halophytes that can specifically absorb more Na than K, and others like sunflower demonstrated for domestic large-scale tests. Easily cultivated and harvested plants without harmful effect on new agriculture were also considered.

Seedings prepared were first grown for a certain term. Additive-free, 133 Cs and 88 Sr groups, which are both stable isotopes, were then made. Cs (CsCl) and Sr (SrCl₂·6H₂O) contents in cultures were 1.6836 mg/L (0.01 mM) and 266.62 mg/L (1 mM), respectively.

Stems, leaves and roots were harvested, in principle, two weeks after the addition, to measure K, Ca, Mg, Sr and Cs concentrations in them. Considering the examination period, a content rate (i.e. element amount per dry sample weight) was regarded as an index.

It was concluded that New Zealand spinach and ice plant were most adequate for removing contaminants from surface soil. The two accumulate Cs and Sr mostly in the shoots, are prostrate, and spread the roots shallowly. For valid application, growth-phase dependences of absorption and distribution, growth property and root distribution should be elucidated.

Plants that meet the present purpose are ones that specifically absorb object substances, or that show normal absorption but high removal rate per area due to the large bulk size. The latter view also needs to be evaluated when the field test is conducted, since developing stages of the plants used in the present work were not correspondent.

Finally, the application study plan was developed based on the screening test results.

Keywords: Phytoremediation, Cs, Sr, Screening Test

This work has been performed in JAEA as a joint research with Tottori University *Faculty of Agriculture, Tottori University

目 次

1.	はじめに	1
2.	供試植物の選定	2
3.	試験方法	6
4.	結果と考察	8
5.	適用可能性の調査計画	12
6.	結論	15
参考文	献	16
付録		17
付録A	選抜栽培試験の記録 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	19
付録B	結果一覧	27
付録C	現地気候	30

Contents

1.	Introduction	1
2.	Plants selection	2
3.	Experimental methods	6
4.	Results and discussion	8
5.	Application study plan	12
6.	Conclusion	15
Re	ferences ·····	16
Apj	pendix ·····	17
Apj	pendix A: Pictures	19
Apj	pendix B: Supplemental data	27
Apj	pendix C: Meteorological condition in Fukushima	30

1. はじめに

福島第一原子力発電所の事故により、放射性物質が広範囲に降下した。これに伴う課題のひと つが環境修復であり、表層土壌の削り取りや湛水による洗浄など、様々な方策が提案・検討され ている。鳥取大学農学部と日本原子力研究開発機構人形峠環境技術センターは、農地土壌等にお ける環境修復技術開発として、植物を利用した手法(ファイトレメディエーション)について検 討している。

平成23年度は、フィールドでの実証試験に供しうる有望な植物種を2、3種程度選定するため、 必要な温度と照度を調節した環境で、水耕栽培によるスクリーニング試験を実施した。対象核種 は¹³⁴Cs(半減期2年)と¹³⁷Cs(30年)としたが、相対的にわずかに環境へ飛散した⁹⁰Sr(半減期 29年)についても考慮した。本試験では、安定同位体である¹³³Csと⁸⁸Srの試薬を使用した。

2. 供試植物の選定

Csの植物吸収に関して最も包括的なデータを示した研究のひとつが、Broadley ら^[1]によるもの である。この研究では、茎葉の Cs の吸収濃度に関する論文(14件)を集めて、メタアナリシス を行っている(表1)。収集されたデータは136分類群に相当し、概ね、単子葉植物綱より双子葉 植物綱で、3 倍程度 Cs を蓄積しやすいことが示されている。しかし、下位分類によっても Cs 吸 収能力の相対値は異なり、全体で40%以上の変動がみられた。亜綱(Subclass)の分類群におい ては、塩生植物が多く属するナデシコ亜綱が最も高い相対値を示した。塩生植物は一般に、陽イ オン吸収における選択性が低いとされ、Cs の吸収能力とも関係があるだろうと議論されている。 科(Family)の分類群においては、ヒユ科(ナデシコ目)が著しく高く、次いでアカザ科(ナデ シコ目)、アサ科(イラクサ目)の順であった。

山上ら^[2]は環境浄化用植物の探索に向けて、まず 20 種の栽培植物を事前選定し、次いで、これ ら種における Cs と Sr の吸収量(µg/m²)を試験した。Cs をよく吸収する植物として、スベリヒ ユ (スベリヒユ科)、アマランサス(ヒユ科ヒユ属の総称)、ヒマワリ(キク科)、カキチシャ(レ タス)(キク科)を候補とした。これは、表1の結果(ナデシコ目で Cs が高吸収)とも一致する。 また、Sr については、ヒマワリ、アマランサスを候補とした。

Dushenkov ら^[3]は、チェルノブイリ付近のフィールドにおいて選定試験を行った。供試植物は 10種16品種で、アオゲイトウ(ヒユ科)4品種、ヒモゲイトウ(ヒユ科)3品種、スギモリケイ トウ(ヒユ科)、ホソアオゲイトウ(ヒユ科)、ハゲイトウ(ヒユ科)、キクイモ(キク科)、ヒマ ワリ(キク科)、キクイモとヒマワリの交配種、トウモロコシ(イネ科)、エンドウマメ(マメ科)、 カラシナ(アブラナ科)であった。結果として、Csの蓄積量は概してケイトウ(ヒユ科)が高く、 表1とも整合する。トウモロコシ、キクイモ、カラシナについては部位別(茎葉、根)のCs 濃度 も検討しており、いずれも根の方が3倍ほど高かった。さらに、単位面積当たりの収穫量(g/m²) と植物中Cs 濃度の観点からも議論がなされており、これはファイトレメディエーションの適用を 考える際の重要事項である。

福島第一原子力発電所の事故を受けて、2011年度には、国内で大規模な試験が行われた。農林 水産省は、ヒマワリ、アマランサス、ケナフ(アオイ科)、キノア(アカザ科)等を、現地あるい は試験研究機関の圃場で栽培し、Csの吸収量を検討している^[4]。また、日本原子力研究開発機構 は、様々な品種のシバを用いた現地試験を行っている^[5]。

一方、実環境への適用の観点から、栽培に手間がかかるものやネット栽培や機械での刈取り等 が困難で簡便に収穫できないもの、回復後に周辺環境への影響を及ぼしたり農作の妨害をしたり するものについては選定できないと考えた。

上記の結果として、次の9種を供試植物として選定した。

- ・キクイモ(キク科)
 ・アイスプラント(ハマミズナ科)
 ・ナタネ(アブラナ科)
- ・シバ(ギョウギシバ(イネ科))
- ・ヒマワリ(キク科)
- ・ツルナ(ハマミズナ科)
 ・ニガヨモギ(キク科)

・キリンソウ (ベンケイソウ科)

ツルナ、ハナスベリヒユ、アイスプラントは、カリウムよりもナトリウムを特異的に吸収する 塩生植物を多く有するナデシコ亜綱(ナデシコ目)に属し、高いCs 吸収能が期待された(表1)。 このほか、国内で大規模な試験が行われているヒマワリとシバ(ギョウギシバ)を選定した。ヒ マワリは山上らのデータで好成績を示しており、同じキク科のキクイモ、ニガヨモギもあわせて 選んだ。ナタネの属するアブラナ科も、Csを比較的よく吸収すると思われた(表1)。キリンソウ については、特に文献等はなかったが、国内で法面植生等に広く利用されていることから選定し た。

綱 (Class)		亜綱 (Subclass)		目 (Order)		科 (Family)		種 (Species)
双子葉植物綱	13.56	モクレン亜綱	6.29	キンポウゲ目	5.38	キンポウゲ科		
				ケシ目	6.74	ケシ科	6.74	
		マンサク亜綱	17.02	イラクサ目	17.02	アサ科	21.48	
						イラクサ科	12.56	
		ナデシコ亜綱	24.54	ナデシコ目	27.90	アカザ科	22.31	ビート[1]
								セイヨウハマアカザ[1]
								ヤマホウレンソウ[1]
								ロシアアザミ[1]
								オカヒジキ[1]
								ホウキグサ[2]
						ヒユ科	80.03	ヒユ[1]
								アオゲイトウ ^[1,3]
								アマランサス ^[2]
								ケイトウ[2]
								ヒモゲイトウ ^[3]
								スギモリケイトウ ^[3]
								ホソアオゲイトウ ^[3]
								ハゲイトウ ^[3]
						ナデシコ科	7.38	
						スベリヒユ科	-	ハナスベリヒユ
								スベリヒユ ^[2]
						ハマミズナ科	-	<u>ツルナ</u>
								<u>アイスプラント</u>
				タデ目	4.37	タデ科	4.37	エゾノギシギシ ^[1]
		ビワモドキ亜綱	13. 72	アオイ目	3.85	アオイ科		
				スミレ目	15.39	ハンニチバナ科	13.13	
						ウリ科	17.66	カボチャ ^[2]
				フウチョウソウ目	14.01	アブラナ科	14.01	<u>ナタネ</u>
								セイヨウアブラナ[1]
								カラシナ ^[1,3]
								サントウサイ ^[2]
								カブ ^[2]
								コールラビ ^[2]
								ルタバガ ^[2]
		バラ亜綱	9.26	マメ目	10.03	マメ科	10.03	ムラサキツメクサ[1]

表1 被子植物の茎葉における Cs 吸収濃度の相対値

								シロツメクサ[1]
								タチオランダゲンゲ[1]
								オオヤハズエンドウ[1]
								ソラマメ[1]
								インゲンマメ[1]
								テパリービーン ^[1]
								シナガワハギ[1]
								エンドウマメ ^[3]
				アマ目	1.78	アマ科		
				セリ目	7.65	セリ科	7.65	
				バラ目	_	ベンケイソウ科	_	<u>キリンソウ</u>
		キク亜綱	7.53	ナス目	6.36	ナス科	6.87	ジャガイモ[1]
								ナス ^[1]
						ヒルガオ科	8.52	
				ゴマノハグサ目	2.89	ゴマノハグサ科		
				キク目	6.49	キク科	6.49	<u>キクイモ^[3]</u>
								<u>ヒマワリ^[1, 2, 3]</u>
								<u>ニガヨモギ</u>
								ノボウギク ^[1]
								ヤコブボロギク[1]
								チシャ(レタス) ^[1,2]
				キキョウ目	4.82	キキョウ科		
				マツムシソウ目	31.23	オミナエシ科		
				シソ目	_	シソ科	—	タチジャコウソウ ^[2]
								シソ ^[2]
単子葉植物綱	4.43	ツユクサ亜綱	4.61	カヤツリグサ目	4.61	イネ科	4.61	<u>ギョウギシバ</u>
								オオウシノケグサ[1]
								スムーズ・ブロームグ
								ラス ^[1]
								キビ[1]
								トウモロコシ ^[3]
		ユリ亜綱	2.84	ユリ目	2.84	그リ科	2.84	タマネギ[1]
								セイヨウネギ[1]
								セイヨウアサツキ[1]
								ニラ[1]

・綱、亜綱、目、科に関する情報は文献[1]より引用した。

・種の項目は、文献[1-3]の主な供試植物を示した。下線は本試験の供試植物を示す。

3. 試験方法

試験は水道水に培養原液(表2)を添加した水耕栽培によって行った。培養液(水道水と培養 原液の混合液)は週1回交換した。室内は終日25℃とし、午前6時から午後6時まで自然光に加 えて蛍光灯で補光し、必要な温度と照度を調節した。いずれの植物も、まず一定期間の栽培を経 てからCsまたはSrの処理を施した。

キクイモとキリンソウは、入手した苗の土を水で丁寧に洗い流し、直ちに水耕栽培用ポット(4 L) へ移植した。ハナスベリヒユは、成長した個体の茎をカミソリで3 cm 程度切り取り、バーミ キュライトに挿して発根させたものをポットへ移植した。シバは張りシバを用意し、土を洗い流 した後、個体に分けてポットへ移植した。ツルナ、アイスプラント、ナタネ、ヒマワリおよびニ ガヨモギは、バーミキュライトに播種し、発芽後、成長が良好な個体を選抜してポットへ移植し た。ただし、ニガヨモギは苗作りの段階の生育速度が極めて低く、Cs の高吸収が期待できないと 判断し、試験を中止した。

一定期間栽培した後、対照区、Cs添加区、Sr添加区の3区を設け、安定同位体の¹³³Csまたは ⁸⁸Srを以下の通り添加し、処理を開始した。

· 対照区(無添加)

•Cs 添加区 (CsC1:1.6836 mg/L (0.01 mM))

•Sr 添加区 (SrCl₂•6H₂0:266.62 mg/L (1 mM))

処理開始後、原則として2週間の栽培を行った。ただし、ナタネとヒマワリは栽培中に成長が 認められなくなったため、1週間の栽培とした。採取した試料は、根に付着した培養液を蒸留水 で除去し、各器官(茎、葉、根)に解体して、それぞれの新鮮重量を測定した。また、乾燥処理 (70℃で48時間以上)の後、乾燥重量を測定した。各器官は粉砕し、硫酸・過酸化水素法により 分解した。分解試料は、ICP発光分析によってK、Ca、Mg、Sr を、また ICP 質量分析によって Cs を測定した。なお、各添加区につき繰り返し4回試験を行った。

JAEA-Research 2012-015

多量元素	濃度 (mM)	使用塩	微量元素	濃度 (ppm)	使用塩
Ν	2.0	$\rm NH_4 NO_3$	Fe	2	$FeSO_4 \cdot 7H_2O$
Р	0.4	K ₂ HPO ₄	Mn	0.5	$MnSO_4 \cdot 5H_2O$
К	2.0	KC1, K ₂ HPO ₄	В	0.2	H ₃ BO ₃
Са	1.0	$CaCl_2 \cdot 2H_2O$	Zn	0.1	$ZnSO_4 \cdot 7H_2O$
Mg	2.0	$MgSO_4 \cdot 7H_2O$	Cu	0.01	$CuSO_4 \cdot 5H_2O$
			Мо	0.005	$(NH_4)_6 MO_7 O_{24} \cdot 4H_2 O$

表2 水耕栽培で用いた培養原液の組成

4. 結果と考察

環境修復で有望な植物は、除染対象核種を特異的に吸収して高含有率を示す植物、あるいは含 有率は通常であるが植物のサイズが大きいため除去率(面積当たり)が高い植物である。本試験 期間内においては、すべての植物が最大成長に至っていないことから、含有率と乾物重から算出 した吸収量はその植物の最大吸収量には相当しない。このため、「含有率」と「個体あたりの茎葉 における吸収量の割合(分配割合)」を指標とした。結果の概要を表3に示す。

茎葉における含有率については、表3の第二欄に示すとおり、Csでは、ツルナ≫シバ>キクイ モ≈アイスプラントの順で、Srでは、キクイモ≫ナタネ>ヒマワリ>アイスプラント>ツルナの 順で高かった。

茎葉への分配割合については、表3の第三欄に示すとおり、Cs では、ツルナ≈ナタネ≈アイス プラントで、Sr では、シバ≈アイスプラント≈ハナスベリヒユ≈ナタネであった。

この含有率と分配割合との関係を図1に示した。茎葉への分配割合がより高く、含有率がより 高い、図の右上側にプロットがある植物が、本研究の目的に適したものとなる。ツルナはCs添加 区で成績が良く、Sr添加区では、分配割合がやや低く、含有率は中間的な数値であった。次いで、 アイスプラントの分配割合が両元素で高く、含有率も中間的な数値であった。キクイモはSr添加 区で成績が良かったが、同時に成長障害が観察された。乾物重が大きい種であり、健全な生育と 高含有率が得られるSr濃度の低い環境であれば、バイオマスによる高い除去能が期待できる可能 性がある。シバは、根のCs含有率は供試植物の中で最も高いが、茎葉への分配割合が高いグルー プに属し、また、地上部の刈り取りが最も容易であるなどの特徴がある。

総合的に判断して、有望な植物種はツルナとアイスプラントであると結論した。また、ナタネ についても、Csの含有率はやや低いが、ツルナやアイスプラントとは栽培時期が異なるため、年 間を通した適用を考慮すると、適用可能性があると考えた。最終的な評価結果を表3の第四欄に まとめた。

最後に、ツルナとアイスプラントを現地へ適用した際の除染効果について概算する。実際には、 現地の気候に依存する成長速度、生育期間、根の深度分布等の要因が関係することから、オーダ ー程度の議論である。日本原子力研究開発機構が複数の現地サイトにおいて試験している、ギョ ウギシバ(バミューダグラス)の土壌中¹³⁴Cs、¹³⁷Csの吸収率(={シバ全体中Cs量/(シバ全体 中Cs量+残留土壌中Cs量)}×100)は概ね0.5~1%であった^[5]。これに本試験で得られたギョ ウギシバ地上部への分配割合0.78を掛けると、茎葉では0.39~0.78%となる。一方、本試験に おいて、ギョウギシバ個体あたりのCs吸収率(=シバ茎葉中Cs量/初期調製時の培養液中Cs量)) は6.8%(=(0.36 mg/5.32 mg)×100)である。これより、現地試験と本スクリーニング試験に おけるシバのCs吸収率の比は(5.8~11.5)×10⁻²となる。この比がツルナやアイスプラントでも 成立すると仮定すれば、現地で適用した際に予想されるCs吸収率(茎葉)は、1回の収穫で、そ れぞれ1.0~2.0%、0.2~0.4%程度と概算できる。

なお、先行研究における実績としては、以下の通りである。

ブルックヘブン国立研究所(アメリカ)の廃棄物処理の実験用フィールドにて、植物3種(カ

ラシナ、アオゲイトウ、デバリービーン)が15週間にわたって栽培された^[6]。砂状土壌で水はけ が良く、表層20 cmの平均¹³⁷Cs、⁹⁰Sr 濃度はそれぞれ11.8、0.06 kBq/kg であった。その結果、 最も高い除去率を示したのはアオゲイトウ(Cs:2.1%、Sr:4.5%)で、次いでカラシナ、デバ リービーンであった。得られた結果に基づき、アオゲイトウの年2回栽培を想定して、土壌中¹³⁷Cs と⁹⁰Sr の経年変化が概算されている。モデルの妥当性は不明だが、土壌中¹³⁷Cs、⁹⁰Sr 濃度はそれ ぞれ18、7年で半減することが示されている(物理的半減期による減衰は除く)。

チェルノブイリ近郊(ウクライナ)では、大規模な選定試験に加えて(2章参照)、フィールド 試験も行われている^[3]。ローム性砂状土壌において、カラシナの栽培を1作物期中に連続3回(6 週間/回)行った。その結果、表層15 cm の平均¹³⁷Cs 濃度は2558 Bq/kg(試験前)から2239 Bq/kg

(栽培3回目終了後)へ低下した(約12%の減少)。ファイトレメディエーションの対象は吸収 可能な状態のCsに限られるため、本格的な除染手法として適用するには最初の数年が重要と結論 している。



(A) Cs 添加区



(B) Sr 添加区図1 地上部への分配割合と地上部の含有率との関係

供試植物種	地上部での)含有率順位	地上部への)分配割合	評価 (備考)
	Cs	Sr	Cs	Sr	
キクイモ	3	(1)	0.59	0.84	△ (根のCs 集積割合が高いが、乾物重が高い)
ハナスベリヒユ	5	6	0.77	0.84	△ (Sr を主に茎葉に集積)
シバ(ギョウギシバ)	2	7	0.78	0.87	△(根の Cs 含有率が高いが、地上部の刈り取りが容易)
ツルナ	1	5	0.90	0.66	○ (Cs 含有率が高く、主に茎葉に集積)
キリンソウ	8	8	0.39	0.60	×(主に根に集積)
アイスプラント	3	4	0.88	0.86	○ (Cs、Sr 共に茎葉に集積)
ナタネ	5	2	0.88	0.84	△ (Sr を主に茎葉に集積、栽培期間が他と異なる)
ヒマワリ	7	3	0.58	0.81	×(茎葉のCs含有率が低く、根のCs集積割合が高い)
ニガヨモギ	-	_	-	-	×(成長が著しく遅い)

表3 環境修復への候補植物選定に係る評価概要

5. 適用可能性の調査計画

5.1 評価項目

適用可能性に係る評価項目は以下の通りである。フィールド試験のほか、文献調査や水耕栽培 による試験により確認する。

- (1) 現地の気候・風土に係る項目
 - ·気候条件
 - 土壤条件
 - ・地下水の状況、保水状況
 - ・対象物質の分布、濃度、存在状態
- (2) 植物的特徴に係る項目
 - ・移行・吸収能力
 - ·根域深度
 - ・成長率
 - ·一年生、多年生(常緑草、宿根草、球根植物)
 - ・対象物質への耐用性
- (3) 栽培技術に係る項目
 - ・入手しやすさ
 - ・播種、苗植およびその深さ
 - ・栽培密度
 - ・維持管理(施肥、灌漑など)
 - ・生育状況
 - ・収穫時期
 - ・在来種との関係
 - ・他の農作物類との競合可能性
 - ・観察、報告の頻度、必要性
- (4) 費用
 - ・導入・撤去、計画・準備、設備など主要な費用
 - ・労働、光熱水料、肥料、器具・設備の維持管理など栽培にかかる費用
 - ・廃棄物処分など
- (5) そのほか
 - ・拡散・浸食抑制の状況
 - ・除染目標、要求

5.2 適用可能性の調査計画

調査計画を以下の通り定める。

年 度					<u>7</u>	平成 2	4 年度	計え				
試験・調査項目	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3
フィールド試験												
準備(種子購入、現地確認など)		[-	-	-						
・現地確認												
 ・試料採取・分析 資料とりまとめ 												
水耕試験 ・スクリーニング試験の継続 ・混在カリウム等の影響試験												
そのほか資料調査												
成果とりまとめ					• • • •	•						

図2 適用可能性の調査計画

5.3 フィールド試験

フィールド試験の主要な目的は、選抜した植物種の現地環境への適合性と生育特性の汚染領域 への適合性などを確認することである。現地の気侯に依存する成長速度、生育期間、根の深度分 布等の要因が影響する。

フィールド試験を実施するのに適したサイトの特徴および供試植物は以下の通りである。

- (1) 平成 23 年 3 月 11 日以降、耕作されていない田あるいは畑であること。
- (2) 1 サイトの必要面積は植物種毎に概ね4m×4m×3箇所とする。栽培密度は、これまでの経験的知見に基づき、概ね0.4m×0.4mとする。
- (3)供試植物はスクリーニング試験結果をふまえ、ツルナとアイスプラントとするが、そのほか の植物種についても必要に応じて調査する。
- (4) 耕作等を極力行わない。
- (5) 現地での生育状況、生育期間に応じた効果的な収穫方法について検討する。

一般に、ファイトレメディエーションでは、対象物質を特異的に吸収して高含有率を示す植物 種、あるいは含有率は通常であっても植物のサイズが大きく面積あたりの除去率が大きい植物種 が適している。本スクリーニング試験では植物種の生育段階が必ずしも一致していないことから、 フィールド試験の際には後者の観点も含めて確認することが必要である。

5.4 水耕試験

スクリーニング試験を継続するほか、混在カリウム等の影響試験を実施する。

スクリーニング試験の継続により、適用可能性が拡大するほか、栽培時期の異なる植物種について検討することで、効率化が図れる可能性がある。

混在カリウム等の影響試験では、有望種について試験を行う。一般に、粘土鉱物等の層状構造 の間隙に取り込まれたセシウムイオンの結合は強く、容易に移行しない形態で存在する。しかし、 カリウムイオンやアンモニアイオンが多量に存在すると、セシウムイオンがこの間隙から追い出 される場合がある。一方で、セシウムの化学的挙動はカリウムやナトリウムなどアルカリ金属と 類似し、多量のカリウムの存在はセシウムの吸収を阻害する可能性がある。このようなことから、 対象となる土壌中のセシウムの挙動は、施肥などによって影響を受ける可能性があるので、検討 が必要である。

6. 結論

植物による農地土壌等における環境修復技術開発を目的としたフィールドでの実証試験に供し うる有望な植物種を2、3種程度選定するため、必要な温度と照度を調節した環境での水耕栽培に よるスクリーニング試験を実施した。

選定した9種について試験した結果、ツルナは特に茎葉のCs含有率が高く、また、アイスプラントと共にCs、Sr共に主に茎葉に集積するため、有望な植物種と考えられた。ナタネはCs吸収能がやや低いが、他の植物が栽培できない時期に栽培できるため、適用可能性があると考えられた。

本技術開発の目的に適った植物は、対象物質を特異的に吸収して高含有率を示す植物種、ある いは含有率は通常であっても植物のサイズが大きく面積あたりの除去率が大きい植物種であるが、 スクリーニング試験では植物種の生育段階が必ずしも一致していないことから、フィールド試験 の際には後者の観点も含めて確認することが必要である。

これらを踏まえて、適用可能性に係る試験計画を立案した。

参考文献

- M. R. Broadley, N. J. Willey, A. Mead. A method to assess taxonomic variation in shoot caesium concentration among flowering plants. Environmental Pollution 106, pp. 341-349, 1999.
- [2] 山上睦,箭内真寿美,久松俊一.第3章 植物の元素集積性に関する調査研究,平成20年度 環境科学技術研究所年報.
- [3] S. Dushenkov, A. Mikheev, A. Prokhnevsky, M. Ruchko, B. Sorochinsky. Phytoremediation of radiocesium-contaminated soil in the vicinity of Chernobyl, Ukraine. Environmental Science & Technology 33, pp. 469-475, 1999.
- [4] 農林水産省. 農地土壌の放射性物質除去技術(除染技術)について.
 http://www.s.affrc.go.jp/docs/press/110914.htm(閲覧2012年1月16日)
- [5] 福島技術本部 福島環境安全センター、人形峠環境技術センター、安全研究センター サイク ル施設等安全研究ユニット、地層処分研究開発部門 地層処分基盤研究開発ユニット、バッ クエンド推進部門. 芝地造成による土壌の浄化による土壌環境回復試験. JAEA-Research-19 (印刷中).
- [6] M. Fuhrmann, M. M. Lasat, S. D. Ebbs, L. V. Kochian, J. Cornish. Uptake of cesium-137 and strontium-90 from contaminated soil by three plant species; Application to phytoremediation. Journal of Environmental Quality 31, pp. 904-909, 2002.

付 録

This is a blank page.

付録 A 選抜栽培試験の記録(Cs、Sr 処理後の生育状況) 本研究の供試植物の生育状況は以下の通りである。

1. キクイモ

処理開始2週間後の生育状況を写真A.1に示す。写真A.2に示すように、Sr添加区において 新葉、すなわち成長点の阻害が著しかった。

処理開始2週間後の新鮮重と乾物重を図B.1に示す。新鮮重、乾物重ともに、対照区に対して Cs 添加区は増加し、Sr 添加区は減少した。特に、Sr 添加区における茎葉の減少が著しく、対照 区、Cs 処理区との間に有意差が認められた。





対照区 Cs 添加区 Sr 添加区 対照区 Cs 添加区 Sr 添加区
 写真 A.1 処理開始 2 週間後のキクイモの生育状況
 (A: 横からの様子、B:上からの様子)





対照区 Sr 添加区 写真 A.2 処理開始 2 週間後に Sr 添加区で観られた新葉の成長阻害

2. ハナスベリヒユ

処理開始2週間後の生育状況を写真A.3に示す。Cs、Sr添加区ともに障害はみられなかった。 処理開始2週間後の新鮮重と乾物重を図B.1に示す。新鮮重、乾物重ともにCs添加区とSr添 加区が対照区を上回ったが、有意差は認められなかった。



対照区 Cs 添加区 Sr 添加区



対照区 Cs添加区 Sr添加区
 写真 A.3 処理開始 2 週間後のハナスベリヒユの生育状況
 (A:横からの様子、B:上からの様子)

3. シバ

処理開始2週間後の生育状況を写真A.4に示す。Cs、Sr添加区ともに障害はみられなかった。 処理開始2週間後の新鮮重と乾物重を図B.1に示す。新鮮重、乾物重ともに処理間で有意差は 認められなかったが、Sr添加区の茎葉で減少する傾向がみられた。



対照区 Cs添加区 Sr添加区



対照区Cs 添加区Sr 添加区写真 A.4処理開始 2 週間後のシバの生育状況
(A:横からの様子、B:上からの様子)

4. ツルナ

処理開始2週間後の生育状況を写真A.5に示す。Cs、Sr添加区ともに障害はみられなかった。 また、ツルナが匍匐しながら生育する様子を写真A.6に示す。

処理開始2週間後の新鮮重と乾物重を図 B. 1 に示す。新鮮重は対照区に対して Cs、Sr 添加区 ともに増加した。乾物重は Sr 添加区のみで増加したが、対照区との間に有意差はなかった。



対照区

Cs 添加区

Sr 添加区



対照区Cs 添加区Sr 添加区写真 A.5処理開始 2 週間後のツルナの生育状況
(A:横からの様子、B:上からの様子)



(a) 概観(b) 浅土中で根を張る様子写真 A.6 匍匐しながら生育するツルナ

5. キリンソウ

移植前と処理開始2週間後の生育状況をそれぞれ写真A.7、A.8に示す。移植前の苗から約5 週間栽培したが、成長は緩やかであった。一方、その他の植物は移植してからの成長が旺盛であった。

処理開始2週間後の新鮮重と乾物重を図 B.1 に示す。新鮮重、乾物重ともに処理間で有意差は 認められなかった。



写真 A.7 移植前のキリンソウの状況



対照区

Cs 添加区

Sr 添加区



対照区Cs 添加区Sr 添加区写真 A. 8処理開始 2 週間後のキリンソウの生育状況
(A: 横からの様子、B:上からの様子)

6. アイスプラント

処理開始2週間後の生育状況を写真A.9に示す。Cs、Sr添加区ともに障害はみられなかった。 処理開始2週間後の新鮮重と乾物重を図B.1に示す。新鮮重および乾物重ともに、Cs添加区 のみが対照区より減少する傾向があった。



対照区 Cs 添加区

Sr 添加区



対照区Cs 添加区Sr 添加区写真 A.9処理開始 2 週間後のアイスプラントの生育状況
(A:横からの様子、B:上からの様子)

7. ナタネ

処理開始1週間後の生育状況を写真A.10に示す。Cs、Sr添加区ともに障害はみられなかった。 処理開始1週間後の新鮮重と乾物重を図B.1に示す。新鮮重および乾物重ともに処理間で有意 差は認められなかった。





対照区

Cs 添加区

Sr 添加区

(B)



対照区 Cs 添加区 Sr 添加区
 写真 A. 10 処理開始1週間後のナタネの生育状況
 (A:横からの様子、B:上からの様子)

8. ヒマワリ

処理開始1週間後の生育状況を写真A.11に示す。Cs、Sr添加区ともに障害はみられなかった。 処理開始1週間後の新鮮重と乾物重を図B.1に示す。新鮮重および乾物重ともに処理間で有意 差は認められなかった。



 対照区
 Cs 添加区
 Sr 添加区

 写真 A. 11
 処理開始 1 週間後のヒマワリの生育状況

 (A:横からの様子、B:上からの様子)









						今右惑				
供試稙物種	部位 弥	がII区 新鮮重 (g/個体)) 乾物重 (g/個体)	Cs (µg/g)	Sr (mg/g)	K (mg/g)	Ca (mg/g)	Mg (μg/g)	Cs, Sr吸収量 (mg/個体) ^a	分配割合 (-)"
キクイモ	兼	6.02 ± 0.24	0.86 ± 0.03	QN	0.41 ± 0.00	38.75 ± 0.31	14.85 ± 0.57	10.35 ± 0.29	1	
	Cs	6.94 ± 0.32	0.90 ± 0.04	164.88 ± 12.24	0.40 ± 0.00	37.32 ± 1.80	13.13 ± 0.38	9.28 ± 0.48	0.15 ± 0.01	0.45 ± 0.02
	Sr	3.04 ± 0.61	0.49 ± 0.06	ND	12.86 ± 1.03	41.64 ± 1.75	14.88 ± 0.61	9.90 ± 0.18	6.30 \pm 1.03	0.66 ± 0.02
	茎	3.96 ± 0.40	0.35 ± 0.03	0.40 ± 0.46	0.44 ± 0.03	42.55 ± 3.44	6.95 ± 0.53	10.15 ± 0.53		
	Cs	4.25 ± 0.32	0.40 ± 0.05	114.97 ± 17.04	0.41 ± 0.01	38.72 ± 4.01	5.51 ± 0.36	9.08 ± 0.96	0.04 ± 0.00	0.14 ± 0.01
	Sr	1.96 ± 0.11	0.23 ± 0.02	2.71 ± 3.13	6.95 ± 0.53	45.72 ± 2.54	4.97 ± 0.55	7.03 ± 0.44	1.62 ± 0.13	0.18 ± 0.03
	根対照	7.52 ± 0.50	0.54 ± 0.01	0.27 ± 0.32	0.42 ± 0.01	30.48 ± 0.74	3.41 ± 0.19	3.28 ± 0.12	Ι	Ι
	Cs	8.41 ± 0.72	0.62 ± 0.07	217.42 ± 22.15	0.41 ± 0.00	30.60 ± 2.53	3.77 ± 0.23	3.20 ± 0.31	0.13 ± 0.01	0.41 ± 0.03
	Sr	5.99 ± 1.09	0.38 ± 0.07	1.66 ± 1.92	4.17 ± 0.14	49.53 ± 2.63	2.03 ± 0.32	1.84 ± 0.05	1.56 ± 0.27	0.16 ± 0.01
ハナスベリヒュ	茎葉 対照	26.90 ± 2.42	1.50 ± 0.53	2.47 ± 2.17	0.40 ± 0.00	47.61 ± 3.24	3.32 ± 0.28	8.88 ± 0.40		Ι
	Cs	27.60 ± 3.27	2.01 ± 0.23	105.91 ± 1.64	0.41 ± 0.00	55.31 ± 4.87	3.19 ± 0.40	9.64 ± 0.91	0.21 ± 0.03	0.77 ± 0.02
	Sr	26.74 ± 1.74	2.04 ± 0.05	1.48 ± 1.71	4.07 ± 0.25	45.43 ± 2.29	2.36 ± 0.20	7.60 ± 0.37	8.27 ± 0.37	0.84 ± 0.03
	根対照	3.40 ± 0.27	0.27 ± 0.03	9.33 ± 8.23	0.43 ± 0.00	29.58 ± 1.24	2.40 ± 0.08	7.77 ± 2.04	Ι	I
	Cs	3.65 ± 0.20	0.28 ± 0.02	219.92 ± 13.66	0.57 ± 0.04	30.95 ± 1.40	2.38 ± 0.18	6.49 ± 1.48	0.06 ± 0.01	0.23 ± 0.02
	Sr	3.47 ± 0.31	0.26 ± 0.02	1.41 ± 1.63	5.88 ± 1.09	30.35 ± 1.53	2.20 ± 0.18	5.58 ± 0.61	1.55 ± 0.33	0.16 ± 0.03
べい	茎葉 対照	7.40 ± 0.94	1.72 ± 0.26	1.13 ± 0.80	0.40 ± 0.01	27.09 ± 2.65	1.69 ± 0.27	2.15 ± 0.23	Ι	Ι
	Cs	7.66 ± 0.74	1.89 ± 0.17	193.91 ± 12.70	0.40 ± 0.01	28.70 ± 0.37	2.08 ± 0.35	2.41 ± 0.16	0.36 ± 0.03	0.78 ± 0.04
	Sr	5.82 ± 0.55	1.48 ± 0.17	1.53 ± 1.76	2.37 ± 0.66	24.30 ± 3.94	1.40 ± 0.43	2.72 ± 0.60	3.52 ± 1.13	0.87 ± 0.06
	根対照	0.97 ± 0.12	0.13 ± 0.02	1.14 ± 1.11	0.84 ± 0.50	17.37 ± 4.61	0.63 ± 0.50	1.32 ± 0.49	I	I
	Cs	1.16 ± 0.16	0.13 ± 0.01	828.62 ± 196.63	0.46 ± 0.01	13.52 ± 0.58	0.33 ± 0.16	0.88 ± 0.07	0.10 ± 0.02	0.22 ± 0.04
	Sr	0.94 ± 0.12	0.11 ± 0.02	1.38 ± 1.59	3.80 ± 1.35	11.76 ± 0.81	0.75 ± 0.36	1.09 ± 0.30	0.46 ± 0.22	0.13 ± 0.06
ツルナ	茎葉 対照	13.08 ± 0.24	1.29 ± 0.04	0.97 ± 0.83	0.41 ± 0.01	24.55 ± 0.91	5.23 ± 0.11	8.90 ± 0.35	I	I
	Cs	15.16 ± 1.37	1.35 ± 0.04	674.52 ± 33.10	0.40 ± 0.01	28.70 ± 4.63	4.95 ± 0.36	7.68 ± 0.39	0.91 ± 0.04	0.90 ± 0.01
	Sr	16.06 ± 1.62	1.43 ± 0.12	1.40 ± 1.62	4.76 ± 0.58	26.93 ± 2.53	3.29 ± 0.43	7.38 ± 0.78	6.78 ± 0.86	0.66 ± 0.05
	根対照	1.71 ± 0.12	0.11 ± 0.00	2.09 ± 1.40	0.42 ± 0.01	18.85 ± 0.21	1.58 ± 0.11	7.60 ± 0.88	Ι	Ι
	Cs	1.37 ± 0.29	0.15 ± 0.02	647.79 ± 48.11	0.65 ± 0.08	17.38 ± 0.59	1.47 ± 0.09	6.34 ± 0.47	0.10 ± 0.01	0.10 ± 0.01
	Sr	1.78 ± 0.44	0.15 ± 0.01	R	22.25 ± 2.93	16.81 ± 0.41	1.44 ± 0.12	5.49 ± 0.29	3.43 ± 0.61	0.34 ± 0.05
キリンソウ	茎葉 対照	9.75 ± 0.81	1.32 ± 0.10	0.64 ± 0.50	0.41 ± 0.01	10.31 ± 0.50	6.40 ± 0.33	2.50 ± 0.14	Ι	Ι
	Cs	10.02 ± 0.27	1.36 ± 0.06	45.25 ± 6.05	0.42 ± 0.00	10.86 ± 0.54	6.49 ± 0.26	2.58 ± 0.05	0.06 ± 0.01	0.39 ± 0.02
	Sr	7.95 ± 2.16	1.06 ± 0.31	1.55 ± 1.36	1.02 ± 0.05	10.23 ± 0.62	6.61 ± 0.24	2.38 ± 0.09	1.39 ± 0.23	0.60 ± 0.04
	根対照	2.60 ± 0.11	0.34 ± 0.01	0.27 ± 0.31	0.42 ± 0.01	9.39 ± 0.53	4.83 ± 0.69	1.58 ± 0.23	I	I
	Cs.	2.85 ± 0.29	0.34 ± 0.04	255.10 ± 26.76	0.46 ± 0.04	10.36 ± 0.12	5.22 ± 0.45	1.50 ± 0.14	0.09 ± 0.01	0.61 ± 0.02
アイスプラント	A 基本 本 昭	2.34 ± 1.09 58.90 + 7.63	0.20 ± 0.11 9.11 ± 0.17	27.0 H 37.18	2. /2 ± 0. 19 0 03 ± 0 01	87.01 ± 11.07	5 34 + 0 20 5 34 + 0 20	1.48 ± 0.11 6 41 + 0.44	0.09 1 0.00	0.40 ± 0.04
	Cs	36.51 ± 4.44	1.59 ± 0.20	130.47 ± 22.19	0.00 ± 0.00	101.64 ± 5.42	5.16 ± 0.35	6.63 ± 0.41	0.20 ± 0.02	0.88 ± 0.02
	Sr	58.58 ± 15.61	$1 1.82 \pm 1.12$	M	5.23 ± 0.39	103.13 ± 11.11	2.21 ± 0.19	3.19 ± 0.11	9.59 ± 2.02	0.86 ± 0.03
	根 対照	3.52 ± 0.52	0.28 ± 0.01	Ŵ	0.03 ± 0.00	18.86 ± 1.69	2.52 ± 0.16	5.93 ± 0.28	Ι	I
	Cs	3.23 ± 0.37	0.23 ± 0.01	124.32 ± 23.89	0.03 ± 0.01	21.74 ± 5.71	4.18 ± 1.69	6.92 ± 0.87	0.03 ± 0.01	0.12 ± 0.02
	Sr	3.40 ± 0.77	0.25 ± 0.02	ND	6.08 ± 0.91	23.15 ± 2.09	2.38 ± 0.16	6.90 ± 0.45	1.50 ± 0.30	0.14 ± 0.03
ナタネ	茎葉 対照	8.57 ± 0.54	0.83 ± 0.04	0.10 ± 0.05	0.00 ± 0.00	31.56 ± 3.10	8.83 ± 0.71	0.58 ± 0.03	I	I
	Cs	9.04 ± 0.68	0.88 ± 0.05	101.85 ± 7.43	0.00 ± 0.00	29.27 ± 4.55	7.60 ± 0.50	0.48 ± 0.02	0.09 ± 0.01	0.88 ± 0.02
	Er Sr	8.79 ± 0.81	0.98 ± 0.06	0.46 ± 0.32	6.96 ± 0.55	22.73 ± 2.04	5.91 ± 0.27	0.39 ± 0.02	6.97 ± 0.81	0.84 ± 0.01
	限対照	1.65 ± 0.12	0.12 ± 0.01	N	0.03 ± 0.04	27.32 ± 2.10	9.95 ± 7.63	0.51 ± 0.06	I	I
	Cs	1.84 ± 0.12	0.12 ± 0.02	99.89 ± 5.26	0.01 ± 0.01	22.01 ± 1.22	4.13 ± 0.66	0.38 ± 0.04	0.01 ± 0.00	0.12 ± 0.02
= 1 1 1	本 並 1.1mm	1.66 ± 0.13	0.13 ± 0.01	1.86 ± 0.81	9.97 ± 0.98	27.79 ± 1.14	3.02 ± 0.27	0.44 ± 0.07	1.31 ± 0.16	0.16 ± 0.01
ロタレー	きま 対照	17.42 ± 1.38	1.69 ± 0.16	0.70 ± 0.50	0.00 ± 0.00	17.99 ± 1.96	7.35 ± 0.29	6.90 ± 0.29	1	Ι
	Cs	17.31 ± 1.26	1.74 ± 0.12	59.19 ± 11.39	0.00 ± 0.00	20.54 ± 0.87	7.41 ± 0.26	6.20 ± 0.34	0.10 ± 0.01	0.58 ± 0.05
	Sr +H	17.86 ± 0.51	1.73 ± 0.06	0.39 ± 0.19	5.82 ± 0.39	20.06 ± 1.50	7.00 ± 0.50	6.09 ± 0.21	10.16 ± 0.85	0.81 ± 0.02
	検り	(12.33 ± 1.16 10.64 ± 0.67	0.72 ± 0.07	ND + 11 52	0.02 ± 0.02	25.13 ± 1.69	2.70 ± 0.05	2.74 ± 0.25		+ + +
	Sr CS	10.90 ± 1.95	0.64 ± 0.06	112.10 ± 11.00 1.40 ± 0.65	0.00 H 0.00	25.00 ± 2.00	5.21 ± 0.41 9.87 ± 0.33	4.20 ± 0.50 2.10 ± 0.94	9.43 ± 0.56	0.42 ± 0.09
	22	W. dW = 1.60	1 V. D+ - V. VV		0.10	1 ZP, WU = 1, 04		- 5, 13 ± 4, 24	2 to 1 to	

表 B.1 植物の部位別重量、元素含有率、吸収量、分配割合

・測定値の誤差は標準誤差である。
 ・1.500場合はCs吸収、Sr添加区の場合はSr吸収を示す。

付録C 現地気候

現地の気侯については、気象庁のアメダスのデータを利用できる^[A]。気温、降水量、日照時間 について、平年値を図 C.1 に例示する。福島地方の気温変化は、鳥取市より 2~5℃程度低いもの の、変化は似ている。また、福島では梅雨期よりも秋期に降水がやや多く、日照時間も短くなっ ている。植物観測結果では、鳥取地方気象台によれば、鳥取市での平年値は、たんぽぽの開花 3 月 15 日^[B]、いちょう黄葉 11 月 18 日、落葉 11 月 29 日、いろはかえで紅葉 11 月 22 日、落葉 12 月 2 日であり^[C]、一方、福島地方気象台によれば表 C.1^[D]の通りで、植物観測からもやや寒冷な傾 向が確認できる。

参考文献

[A] 気象庁. 気象統計情報 > 過去の気象データ検索
 http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php (閲覧 2012 年 2 月 9 日)

- [B] 気象庁. 鳥取地方気象台 > 季節の話題 > 「春の花『タンポポ』」
 http://www.jma-net.go.jp/tottori/column/2010/03/03.html(閲覧2012年2月9日)
- [C] 気象庁. 鳥取地方気象台 > 季節の話題 > 「秋のコウヨウ」
 http://www.jma-net.go.jp/tottori/column/2009/10/10.html(閲覧2012年2月9日)
- [D] 気象庁. 福島地方気象台 > 福島県の気候: 生物季節観測 http://www.jma-net.go.jp/fukushima/kikou/kikou_seibutsu.html (閲覧 2012 年 2 月 9 日)



図 C.1 現地気侯^[A] (1981 年から 2010 年までの平均値。ただし、飯舘、浪江の日照時間は 1986 年から 2010 年までの平均値) (a)気温、(b)降水量、(c)日照時間

種目	現象	平年値	種目	現象	平年値
うめ	開花	3月7日	のだふじ	開花	5月4日
つばき	開花	3月19日	かき	開花	5月31日
たんぽぽ	開花	3月30日	あじさい (真花)	開花	6月28日
そめいよしの	開花	4月9日	やまはぎ	開花	7月28日
]]	満 開	4月13日	さるすべり	開花	7月30日
しば	発 芽	4月14日	すすき	開花	8月26日
もも	開花	4月14日	さざんか	開花	10月22日
やまぶき	開花	4月19日	いちょう	黄 葉	10月30日
いちょう	発芽	4月18日	11	落 葉	11月14日
くわ	発 芽	4月20日	いろはかえで	紅葉	11月13日
なし	開花	4月19日		落 葉	12月2日
やまつつじ	開花	4月24日			

表 C.1 植物季節観測(福島)^[D]

表2. 基本単位を用いて表されるSI組立単位の例 表1. SI 基本単位

甘木県	SI 基本ì	単位
基个里	名称	記号
長さ	メートル	m
質 量	キログラム	kg
時 間	秒	s
電 流	アンペア	Α
熱力学温度	ケルビン	Κ
物質量	モル	mol
光 度	カンデラ	cd

	100		
组立量		SI 基本単位	
和立里		名称	記号
面	積	平方メートル	m ²
体	積五	立法メートル	m ³
速さ,速	度 >	メートル毎秒	m/s
加速	度 >	メートル毎秒毎秒	m/s^2
波	数每	毎メートル	m ⁻¹
密度,質量密	度 =	キログラム毎立方メートル	kg/m ³
面 積 密	度	キログラム毎平方メートル	kg/m ²
比 体	積ゴ	立方メートル毎キログラム	m ³ /kg
電流密	度フ	アンペア毎平方メートル	A/m^2
磁界の強	さフ	アンペア毎メートル	A/m
量濃度 ^(a) ,濃	度日	モル毎立方メートル	mol/m ³

第一の「濃度」での「海」で「シートル」 mol/m³ 量濃度にの、濃度モル毎立方メートル mol/m³ 量濃度キログラム毎立法メートル g^{\dagger} かンデラ毎平方メートル cd/m^2 折率(b^{\dagger} (数字の) 1 1 透磁率(b^{\dagger} (数字の) 1 1 質 輝 屈 透磁 比

(a) 量濃度 (amount concentration) は臨床化学の分野では物質濃度 (substance concentration) ともよばれる。
 (b) これらは無次元量あるいは次元1をもつ量であるが、そのこと を表す単位記号である数字の1は通常は表記しない。

表3. 固有の名称と記号で表されるSI組立単位

			SI 組立単位	
組立量	名称	記号	他のSI単位による 表し方	SI基本単位による 表し方
平 面 角	ヨラジアン ^(b)	rad	1 ^(b)	m/m
立 体 牟	コテラジアン ^(b)	$sr^{(c)}$	1 ^(b)	m ² /m ²
周 波 数	ベルツ ^(d)	Hz		s ⁻¹
力	ニュートン	Ν		m kg s ^{'2}
圧力,応力	パスカル	Pa	N/m ²	m ⁻¹ kg s ⁻²
エネルギー,仕事,熱量	ビュール	J	N m	m ² kg s ⁻²
仕事率, 工率, 放射束	モワット	W	J/s	$m^2 kg s^{\cdot 3}$
電荷,電気量	ローロン	С		s A
電位差(電圧),起電力	ボルト	V	W/A	m ² kg s ⁻³ A ⁻¹
静電容量	マアラド	F	C/V	$m^{2} kg^{1} s^{4} A^{2}$
電気抵抗	ī オーム	Ω	V/A	$m^2 kg s^{\cdot 3} A^{\cdot 2}$
コンダクタンフ	ジーメンス	S	A/V	$m^{-2} kg^{-1} s^3 A^2$
磁芽	ミウエーバ	Wb	Vs	$m^2 kg s^2 A^1$
磁束密度	テスラ	Т	Wb/m ²	kg s ⁻² A ⁻¹
インダクタンフ	、ヘンリー	Н	Wb/A	$m^2 kg s^2 A^2$
セルシウス温度	モルシウス度 ^(e)	°C		K
光 東	モルーメン	lm	cd sr ^(c)	cd
照度	レクス	lx	lm/m^2	m ⁻² cd
放射性核種の放射能 ^(f)	ベクレル ^(d)	Bq		s ⁻¹
吸収線量,比エネルギー分与,	グレイ	Gv	J/kg	m ² s ⁻²
カーマ		сл <i>у</i>	0/11g	III 5
線量当量,周辺線量当量,方向 性線量当量,個人線量当量,	シーベルト (g)	Sv	J/kg	$m^2 s^2$
酸 素 活 相	カタール	kat		s ⁻¹ mol
				0 11101

(a)SI接頭語は固有の名称と記号を持つ組立単位と組み合わせても使用できる。しかし接頭語を付した単位はもはや

(a)SI接頭語は固有の名称と記号を持つ組立単位と組み合わせても使用できる。しかし接頭語を付した単位はもはや コヒーレントではない。
 (b)ラジアンとステラジアンは数字の1に対する単位の特別な名称で、量についての情報をつたえるために使われる。 実際には、使用する時には記号rad及びsrが用いられるが、習慣として組立単位としての記号である数字の1は明 示されない。
 (o)剤光学ではステラジアンという名称と記号srを単位の表し方の中に、そのまま維持している。
 (d)ヘルツは周期現象についてのみ、ベクレルは放射性核種の統計的過程についてのみ使用される。
 (e)セルシウス度はケルビンの特別な名称で、セルシウス選びを大しに使用される。セルシウス度とケルビンの 単位の大きさは同一である。したかって、温度差や温度間隔を表す数値はどちらの単位で表しても同じである。
 (f)放射性核種の放射能(activity referred to a radionuclide)は、しばしば認った用語で"radioactivity"と記される。
 (g)単位シーベルト(PV,2002,70,205)についてはCIPM勧告2(CI-2002)を参照。

表4. 単位の	中に固有の名称と記号を含むSI組立単位の例

	S. S.	I 組立単位	
組立量	名称	記号	SI 基本単位による 表し方
粘度	パスカル秒	Pa s	m ⁻¹ kg s ⁻¹
カのモーメント	ニュートンメートル	N m	m ² kg s ⁻²
表 面 張 九	ニュートン毎メートル	N/m	kg s ⁻²
角 速 度	ラジアン毎秒	rad/s	m m ⁻¹ s ⁻¹ =s ⁻¹
角 加 速 度	ラジアン毎秒毎秒	rad/s^2	m m ⁻¹ s ⁻² =s ⁻²
熱流密度,放射照度	ワット毎平方メートル	W/m^2	kg s ^{'3}
熱容量、エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K	$m^2 kg s^{-2} K^{-1}$
比熱容量, 比エントロピー	ジュール毎キログラム毎ケルビン	J/(kg K)	$m^2 s^{-2} K^{-1}$
比エネルギー	ジュール毎キログラム	J/kg	$m^{2} s^{2}$
熱伝導率	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m K)	m kg s ⁻³ K ⁻¹
体積エネルギー	ジュール毎立方メートル	J/m ³	m ⁻¹ kg s ⁻²
電界の強さ	ボルト毎メートル	V/m	m kg s ⁻³ A ⁻¹
電 荷 密 度	クーロン毎立方メートル	C/m ³	m ⁻³ sA
表 面 電 荷	クーロン毎平方メートル	C/m^2	m ⁻² sA
電束密度, 電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² sA
誘 電 卒	ファラド毎メートル	F/m	$m^{-3} kg^{-1} s^4 A^2$
透磁 卒	ヘンリー毎メートル	H/m	m kg s ⁻² A ⁻²
モルエネルギー	ジュール毎モル	J/mol	$m^2 kg s^2 mol^{-1}$
モルエントロピー, モル熱容量	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol K)	$m^{2} kg s^{2} K^{1} mol^{1}$
照射線量 (X線及びγ線)	クーロン毎キログラム	C/kg	kg ⁻¹ sA
吸収線量率	グレイ毎秒	Gy/s	$m^2 s^{-3}$
放 射 強 度	ワット毎ステラジアン	W/sr	$m^4 m^{2} kg s^{3} = m^2 kg s^{3}$
放射輝度	ワット毎平方メートル毎ステラジアン	$W/(m^2 sr)$	m ² m ⁻² kg s ⁻³ =kg s ⁻³
酵素活性濃度	カタール毎立方メートル	kat/m ³	$m^{3} s^{1} mol$

表 5. SI 接頭語							
乗数	接頭語	記号	乗数	接頭語	記号		
10^{24}	ヨ タ	Y	10^{-1}	デシ	d		
10^{21}	ゼタ	Z	$10^{.2}$	センチ	с		
10^{18}	エクサ	Е	10^{-3}	ミリ	m		
10^{15}	ペタ	Р	10^{-6}	マイクロ	μ		
10^{12}	テラ	Т	10^{-9}	ナノ	n		
10^{9}	ギガ	G	$10^{\cdot 12}$	ピョ	р		
10^{6}	メガ	М	$10^{.15}$	フェムト	f		
10^{3}	キロ	k	$10^{\cdot 18}$	アト	а		
10^{2}	ヘクト	h	$10^{.21}$	ゼプト	z		
10^{1}	デ カ	da	10^{-24}	ヨクト	У		

表 6. SIに属さないが、SIと併用される単位				
名称	記号	SI 単位による値		
分	min	1 min=60s		
時	h	1h =60 min=3600 s		
日	d	1 d=24 h=86 400 s		
度	۰	1°=(п/180) rad		
分	,	1'=(1/60)°=(п/10800) rad		
秒	"	1"=(1/60)'=(п/648000) rad		
ヘクタール	ha	1ha=1hm ² =10 ⁴ m ²		
リットル	L, l	1L=11=1dm ³ =10 ³ cm ³ =10 ⁻³ m ³		
トン	t	1t=10 ³ kg		

表7. SIに属さないが、SIと併用される単位で、SI単位で

表される数値が実験的に得られるもの					
名称				記号	SI 単位で表される数値
電	子 オ	゛ル	Ч	eV	1eV=1.602 176 53(14)×10 ⁻¹⁹ J
ダ	ル	ŀ	\sim	Da	1Da=1.660 538 86(28)×10 ⁻²⁷ kg
統-	一原子	質量単	〔位	u	1u=1 Da
天	文	単	位	ua	1ua=1.495 978 706 91(6)×10 ¹¹ m

表8.SIに属さないが、SIと併用されるその他の単位					
	名称		記号	SI 単位で表される数値	
バ	_	ル	bar	1 bar=0.1MPa=100kPa=10 ⁵ Pa	
水銀	柱ミリメー	トル	mmHg	1mmHg=133.322Pa	
オン	グストロ・	- 4	Å	1 Å=0.1nm=100pm=10 ⁻¹⁰ m	
海		里	М	1 M=1852m	
バ		\sim	b	1 b=100fm ² =(10 ⁻¹² cm)2=10 ⁻²⁸ m ²	
1	ツ	ŀ	kn	1 kn=(1852/3600)m/s	
ネ		パ	Np	ロ光伝しの粉はめた眼接は	
ベ		ル	В	51単位との数値的な関係は、 対数量の定義に依存。	
デ	ジベ	ル	dB -	X19X ± 17 AC44 (* [X1])	

表9. 固有の名称をもつCGS組立単位					
名称	記号	SI 単位で表される数値			
エルク	erg	1 erg=10 ⁻⁷ J			
ダイン	dyn	1 dyn=10 ⁻⁵ N			
ポアフ	P	1 P=1 dyn s cm ⁻² =0.1Pa s			
ストークフ	St	$1 \text{ St} = 1 \text{ cm}^2 \text{ s}^{\cdot 1} = 10^{\cdot 4} \text{m}^2 \text{ s}^{\cdot 1}$			
スチルフ	sb	$1 \text{ sb} = 1 \text{ cd} \text{ cm}^{2} = 10^{4} \text{ cd} \text{ m}^{2}$			
フォト	ph	1 ph=1cd sr cm 2 10 ⁴ lx			
ガル	Gal	$1 \text{ Gal} = 1 \text{ cm s}^{-2} = 10^{-2} \text{ ms}^{-2}$			
マクスウェル	Mx	$1 \text{ Mx} = 1 \text{G cm}^2 = 10^{-8} \text{Wb}$			
ガウジ	G	$1 \text{ G} = 1 \text{Mx cm}^{-2} = 10^{-4} \text{T}$			
エルステッド ^(c)	Oe	1 Oe ≜ (10 ³ /4π)A m ⁻¹			
(。) 9 元 5 の 0 C C 単位 5 し CI でけ 古 培 比 軟 で き わ い た み ゲ 早 「 △					

3元系のCGS単位系とSI Cは は対応関係を示すものである。

	表10. SIに属さないその他の単位の例								
	3	名利	К		記号	SI 単位で表される数値			
キ	ユ		IJ	ĺ	Ci	1 Ci=3.7×10 ¹⁰ Bq			
ν	\sim	ŀ	ゲ	\sim	R	$1 \text{ R} = 2.58 \times 10^{-4} \text{C/kg}$			
ラ				ĸ	rad	1 rad=1cGy=10 ⁻² Gy			
ν				Д	rem	1 rem=1 cSv=10 ⁻² Sv			
ガ		$\boldsymbol{\nu}$		7	γ	1 γ =1 nT=10-9T			
フ	r		ル	i.		1フェルミ=1 fm=10-15m			
メー	ートル	系	カラゞ	ット		1メートル系カラット = 200 mg = 2×10-4kg			
ŀ				ル	Torr	1 Torr = (101 325/760) Pa			
標	準	大	気	圧	atm	1 atm = 101 325 Pa			
力	Ц		IJ	_	cal	1cal=4.1858J(「15℃」カロリー), 4.1868J (「IT」カロリー) 4.184J(「熱化学」カロリー)			
ŝ	ク			\sim	μ	$1 \mu = 1 \mu m = 10^{-6} m$			

この印刷物は再生紙を使用しています