



【除染植物「ネピアグラス」実証試験】
および
【バイオエタノールの生産・利用可能性】

弘前大学農学生命科学部
生物共生教育研究センター金木農場・姜 東鎮

【除染現状】

現在、国による警戒区域内での農地除染は2~3cm程度の表土を削り取る物理的手法で本格的に行われている。その除染効果は非常に高く、汚染土壌から概ね80~85%の放射性セシウムを除去することができる(言い換えると15~20%のセシウムは除去できない)。削り取った表土の処分が大きな課題として残っているが、除染効果そのものは極めて高いものである。それに比べて植物による除染効果は小さい。現状、これまでの植物による除染効果は最大で0.2%未満である。

【ネピアグラスを含む植物による除染のメリット】

- ①国が行っている表土剥離法では100%の除染は不可能であり、除染後にも土壌中に概ね15%~20%程度の放射性セシウムが農地に残ってしまう。除染後、農地に残る放射性セシウムの除去を広範囲かつ安価で除染ができる。
- ②原子力発電所事故の前に農地がすでに耕起・耕耘され、土壌の深いところまで放射性セシウムに汚染されて表土剥離法で除染が困難な農地にきわめて有効である。
- ③農用地は耕作しなければ農地としての機能を失い、やがて原野に戻ってしまう。除染植物のネピアグラスを栽培し、確実に除染することで、除染と農地保全の両方が可能になる。
- ④巨大な茎葉部乾物収量を持つネピアグラスは除染後にバイオ燃料の原料としての利用可能性が高く、バイオ燃料にすることで、減量化が可能な除染植物である。

ネピアグラス (Napiergrass) (*Pennisetum purpureum* Schum.)

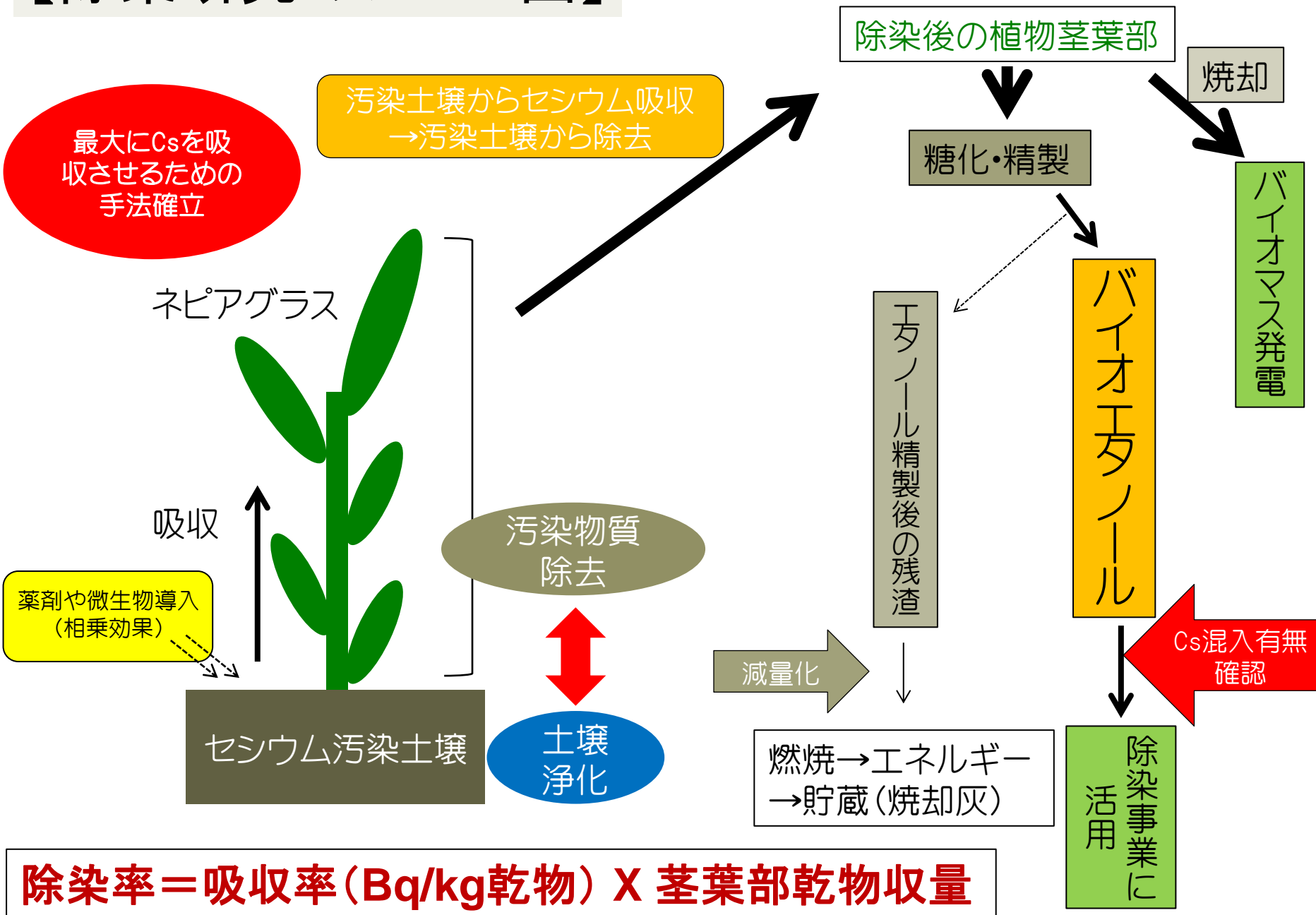
- ☐ 熱帯アフリカ原産C₄イネ科牧草
- ☐ 巨大な乾物収量 (最大85t/ha/年)
- ☐ 高い草丈 (4m): 一般品種
- ☐ 多分げつ数: 特に矮性品種
- ☐ 栄養繁殖植物 (分げつ芽・越冬芽)



矮性品種

越冬芽は主に下位節
に形成される

【除染研究のフロー図】



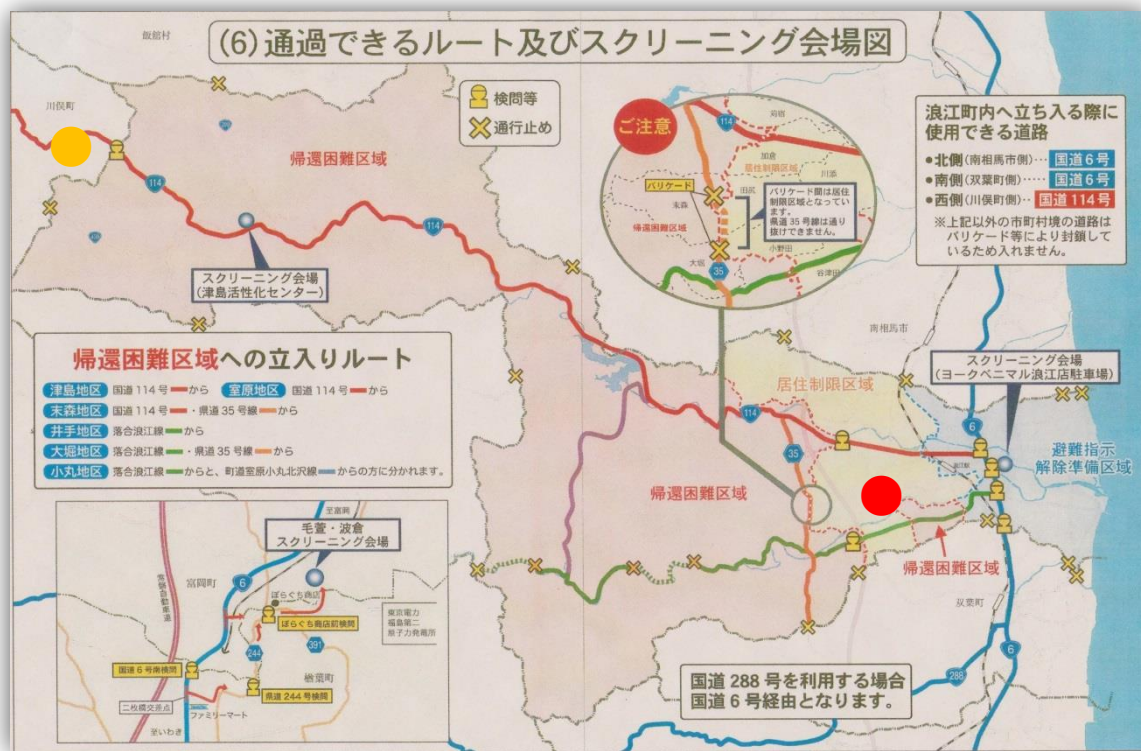
$$\text{除染率} = \text{吸収率 (Bq/kg乾物)} \times \text{茎葉部乾物収量}$$

【H25:ネピアグラスによる放射性セシウム除去効率向上】 (浪江町居住制限区域内)

実証試験概要

- 土壌の違いがあるか？
- 刈り取り回数に違いがあるか？
- 栽植密度に違いがあるか？
- 菌根菌の効果があるか？

● 表土剥離法による除染(川俣町)



● ネピアグラス実証試験サイト

浪江町大字田尻字東畑(水田)

浪江町大字田尻字後田(牧草地)

実証試験サイトの土壌特性(福島県浪江町)

パラメーター	サイト	
	水田跡地	牧草地跡地
粒子分布		
% 砂利 (>2 mm)	19.3	16.0
% 砂 (2-0.06 mm)	33.3	33.5
% シルト (0.06-0.002 mm)	20.6	19.7
% 粘土 (<0.002 mm)	26.8	30.8
性質	軽埴土	軽埴土
仮比重 (g/cm ³)	0.81	0.94
土壌酸度 (H ₂ O)	5.7	6.0
全窒素 (g/kg)	4.90	3.30
全カリウム (g/kg)	2.15	2.99
全リン (P ₂ O ₅ , g/kg)	7.40	4.32
腐植 (g/kg)	106.0	58.5
交換性カリウム (cmol(+)/kg)	0.81	1.64
放射性セシウム (Bq/kg 乾土)		
¹³⁴ Cs	13,890	11,670
¹³⁷ Cs	28,010	23,560
Cs総量 (¹³⁴ Cs+ ¹³⁷ Cs)	41,900	35,230

除染実証試験の様子(2013年5月27日～10月29日)

植付け



植付け後4週目



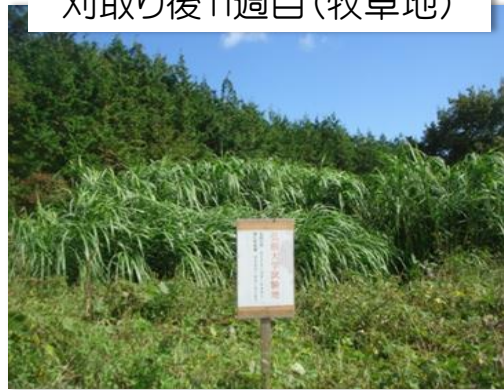
1回目の刈取り(11週目)



刈取り後4週目



刈取り後11週目(牧草地)



刈取り後11週目(水田)



根系



根の採取 (AM菌感染解析)



放射性セシウム吸収率・除染率

土壌	試験区	¹³⁷ Cs 吸収率(Bq/kg)				¹³⁷ Cs 除染率(%)			
		2回刈取り区		2回区平均	1回区	2回刈取り区		2回区合計	1回区
		1回目	2回目			1回目	2回目		
水田	1.0m x 1.0m	4436 a	2142 a	3289 a	813 ns	0.065 b	0.039 b	0.104 b	0.077 b
	0.5m x 0.5m	4064 a	2284 a	3174 a	795 ns	0.227 ab	0.095 ab	0.321 ab	0.243 ab
	0.3m x 0.3m	4263 a	1867 a	3065 a	815 ns	0.534 a	0.187 a	0.721 a	0.408 a
	<u>ソルガム*</u>	600 b	358 b	479 b		0.025 b	0.006 b	<u>0.031 b</u>	
牧草地	1.0m x 1.0m	2648 a	1341 b	1994 a	1910 ns	0.049 b	0.030 b	0.078 c	0.109 b
	0.5m x 0.5m	2941 a	1671 ab	2306 a	2295 ns	0.127 ab	0.072 ab	0.197 b	0.361 ab
	0.3m x 0.3m	3147 a	2012 a	2580 a	1793 ns	0.275 a	0.135 a	0.406 a	0.517 a
	<u>ソルガム*</u>	1243 b	509 c	876 b		0.061 b	0.009 b	<u>0.069 c</u>	

P < 0.05 (Tukey 多重比較検定). 表中の異なるアルファベットは**5%**水準で有意差あり.

*ソルガムは**2**回刈取り区のみ

土壤性質の差異

■ ネピアグラスの乾物収量は土壤種類の違いよりも土壤中の腐植量の多少による影響が大きく、腐植量が多い土壤ほど乾物収量が高く、Cs吸収率(Bq/kg乾物)も高かった。この結果は平成24年度に福島県中通りで行った実証試験結果と同様であった。

栽植密度の差異

■ 密植により、1株当たりの乾物収量は減少するが、単位面積当たりの乾物収量は大きく増加した。特に高密植区(11株/m²)では慣行区(1株/m²)に比べて水田跡地の方で平均8.4倍、牧草地跡地で平均4.6倍乾物収量が増加した。一方で異なる栽植密度間でのCs吸収率に大きな差はなかった。その結果、単位面積当たりの除染率が大きくアップした。

刈り取り回数の差異

■ ネピアグラスのCs吸収率や除染率は水田・牧草地ともに、2回刈り取り区の一草草が二草草に比べて高く、特に水田では年2回刈り取り区の一草草、二草草ともに年1回刈り取り区に比べて高い吸収率を示した。

■ 水田と牧草地の両方とも、2回刈り取り区の乾物収量は1回刈り取り区に比べて低かったが、逆に吸収率は2回刈り取り区の方が極めて高かった。これは1回刈り取り区が2回刈り取り区に比べて乾物収量が高かったため、吸収されたCsの濃度が薄まった結果、吸収率が低くなったと考えられる。

■ 水田における除染率は年2回刈り取り区で最も高く、牧草地における除染率は年1回刈り取り区で最も高かった。

菌根菌の効果

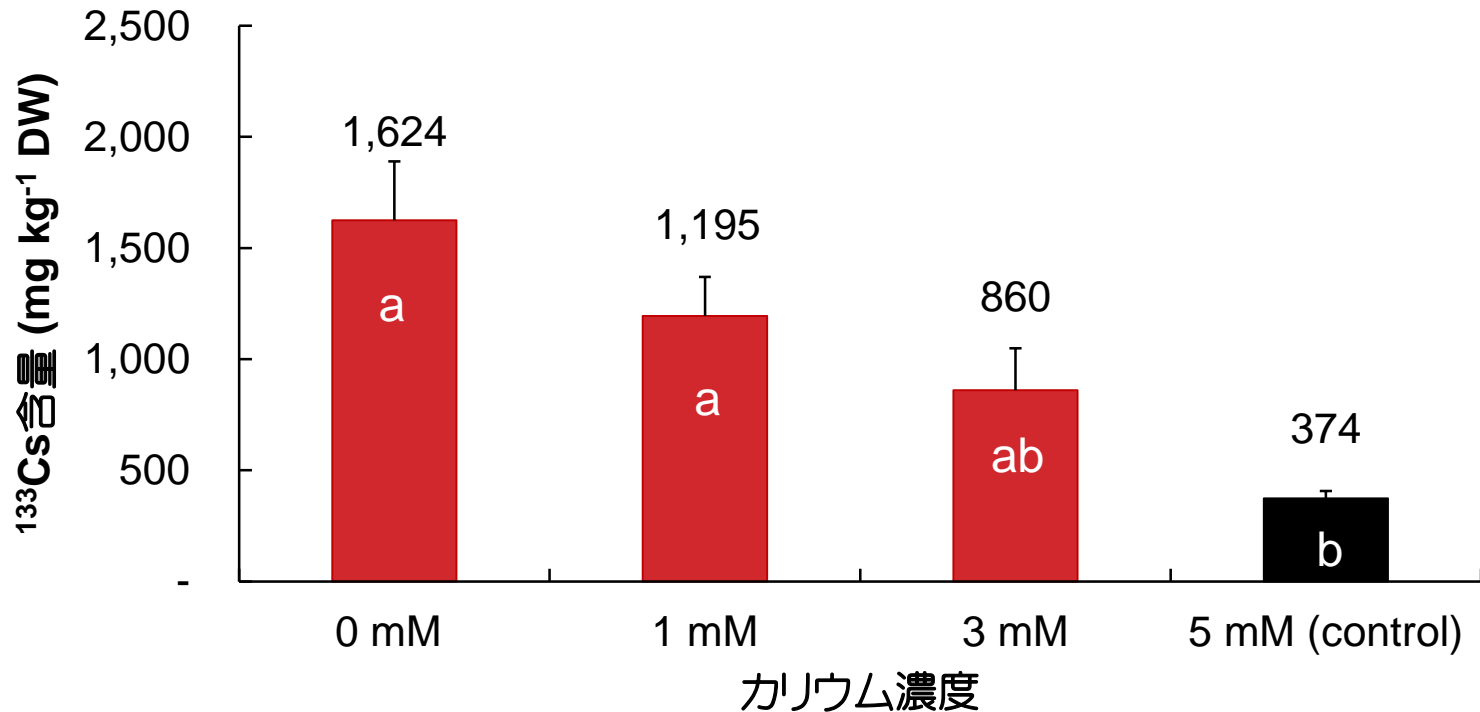
■ 3種類の共生菌根菌を接種した結果、ネピアグラスの根における菌の感染率は無接種区に比べて有意に高かったが、今回使用した3種類の菌根菌においてはいずれの試験区でもネピアグラス乾物収量やCs吸収率に及ぼす効果はなかった(データ未提示)。

ネピアグラスとソルガムの比較

■ ネピアグラスの除染率は除染に効果があるとされるソルガムに比べて極めて高い水準にあった。

セシウム(Cs)とカリウム(K)は同じアルカリ1族のため、植物へ吸収される際、競争的吸収阻害が生じるため、実証試験ではCs吸収量を上げるためにカリウム肥料は与えないで窒素とリン酸だけを施肥する。一方で土壌中には自然界に存在する放射性カリウム(^{40}K)があり、除染回数を重ねるにつれて土壌中の ^{40}K 含量が ^{137}Cs 除染に及ぼす影響は大きい。

異なるカリウム処理による地上部のセシウム吸収



異なるアルファベットは5%水準で有意差あり。

ネピアグラスはカリウム要求度が高いため、カリウムが少ない場合、カリウムのかわりにセシウムを吸収することが明らかになった。

汚染土壌から¹³⁷Csと⁴⁰Kの除去率(%)

土壌	試験区	¹³⁷ Cs 除染率(%)		⁴⁰ K 除去率(%)	
		2回刈取り区合計	1回刈取り区	2回刈取り区合計	1回刈取り区
水田	1.0m x 1.0m	0.104 b	0.077 b	2.87 b	6.19 b
	0.5m x 0.5m	0.321 ab	0.243 ab	7.05 b	15.80 ab
	0.3m x 0.3m	0.721 a	0.408 a	17.48 a	25.85 a
	ソルガム*	0.031 b		2.16 b	
牧草地	1.0m x 1.0m	0.078 c	0.109 b	3.13 bc	1.50 b
	0.5m x 0.5m	0.197 b	0.361 ab	5.60 b	3.95 b
	0.3m x 0.3m	0.406 a	0.517 a	10.27 a	9.66 a
	ソルガム*	0.069 c		1.64 c	

異なるアルファベットは5%水準で有意差あり。

ネピアグラスは¹³⁷Csとともに、⁴⁰Kの除去率も極めて高く、2回刈取り区では10.3~17.5%、1回刈取り区では9.7~25.9%であり、いずれの試験区でも⁴⁰K除去率が高くなると、¹³⁷Cs除染率が反比例して低くなった。

これまで日本国内で行われた主な除染試験結果(圃場レベル)

作物種	土壤環境	土壤中の放射性セシウム濃度	吸収率 (Bq/kg DW)	乾物収量 (t/ha)	除染率(%)	実施年度
アマランサス	水田転換畑	4,370~4,580 Bq/kg	559~3,901	1.7~12.0	0.011~ 0.193	¹³⁴ Cs + ¹³⁷ Cs (2011,2012)
アマランサス	畑	3,108~3,740 Bq/kg	111~664	4.2~12.1	< 0.011	¹³⁴ Cs + ¹³⁷ Cs (2011,2012)
ケナフ	水田転換畑	4,370~4,580 Bq/kg	106~190	10.6~11.5	< 0.008	¹³⁴ Cs + ¹³⁷ Cs (2011,2012)
ケナフ	畑	3,108~3,740 Bq/kg	89~110	12.6~26.2	0.008~0.038	¹³⁴ Cs + ¹³⁷ Cs (2011,2012)
ヒマワリ	褐色森林土	1,110,960 Bq/m ²	629(平均)	—	0.057	¹³⁴ Cs + ¹³⁷ Cs (2011)
ヒマワリ	灰色低地土	250,884 Bq/m ²	146(平均)	—	0.058	¹³⁴ Cs + ¹³⁷ Cs (2011)
ヒマワリ	淡色黒ボク土	93,765 Bq/m ²	35(平均)	—	0.037	¹³⁴ Cs + ¹³⁷ Cs (2011)
イネ	水田	—	—	—	0.003	¹³⁷ Cs
マツバイ	水田	2,700~9,600 Bq/kg	6,000 (最大)	小型水田雑草であるため、極めて低い	20kg/m ² DW できれば6か月で40%除去(??)	¹³⁴ Cs + ¹³⁷ Cs (2011, 2012)
植物表面に付着した粉塵(汚染土壤)の洗浄についての情報なし						
ネピアグラス (H25, 福島県 浪江町)	軽埴土 (水田)	28,010 Bq/kg 3,361,200 Bq/m ²	3,176(平均)	74.9	0.408~0.721	¹³⁷ Cs (2013) 1回&2回刈取り区
	軽埴土 (牧草地)	23,560 Bq/kg 3,321,960 Bq/m ²	2,293(平均)	52.7	0.406~0.517	¹³⁷ Cs (2013) 1回&2回刈取り区

まとめ

■ **ネピアグラスの除染率(0.721%)は除染に効果があるとされるソルガムより6~23倍, アマランサスより4倍程度と極めて高い水準**にあり, 今後, 植物による除染にはきわめて有望であると考えられる.

■ ネピアグラスの除染率はこれまでの除染植物の中でも最も高い除染率を示し, 現在, 進行中の国による**除染(表土剥離法)後に土壤中に残る約15%~20%の放射性セシウムの除去**や原子力発電所事故前にすでに耕起が行われ, **土中まで放射性セシウムで汚染されているため, 表土剥離が困難な農地除染にきわめて有効**であると考えられる.

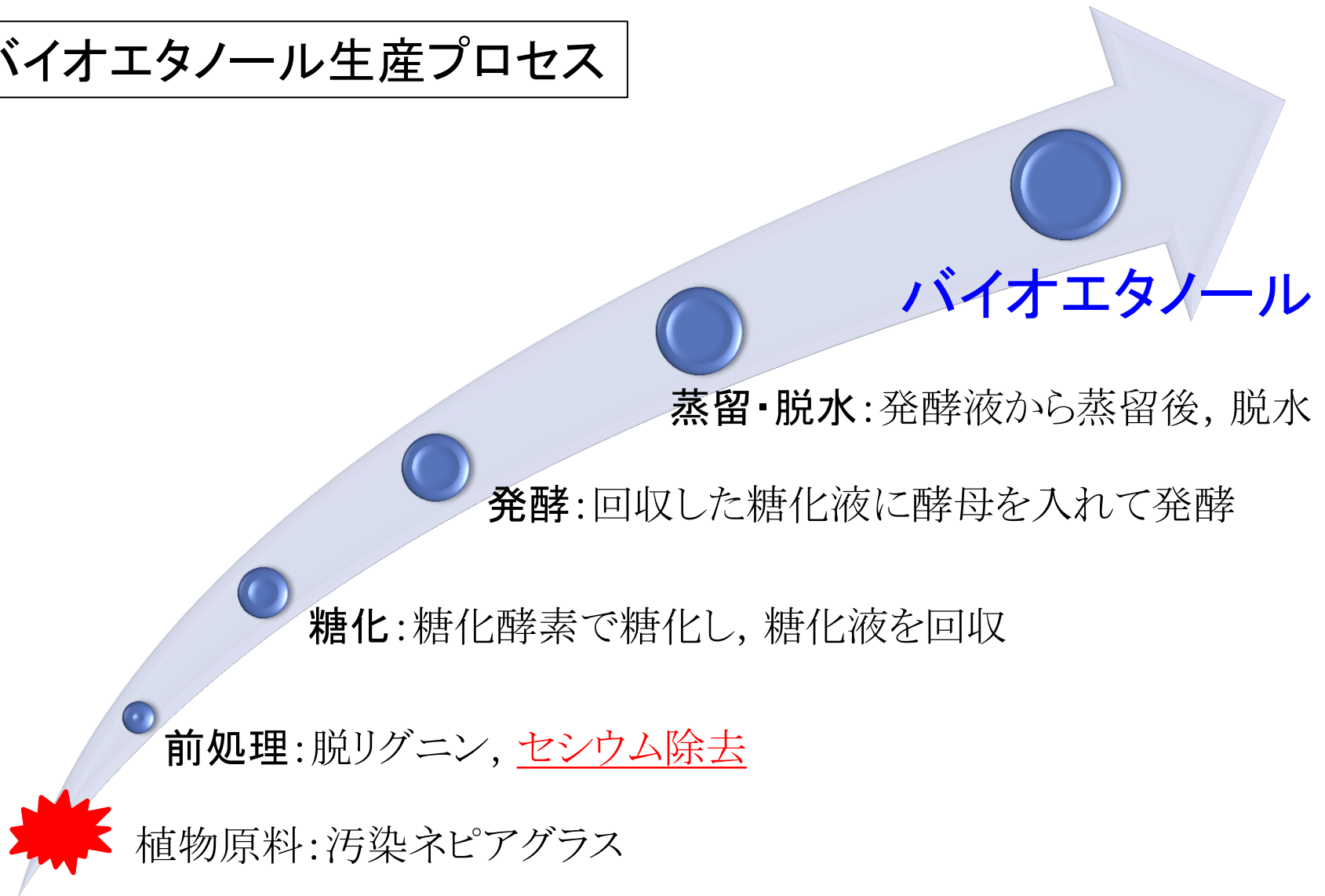
■ 農用地は耕作しなければ農地としての機能を失い, やがて原野に戻ってしまう. **除染植物のネピアグラスを栽培し, 確実に除染することで, 除染と農地保全の両方が可能**となると考える.

■ 来年度からは**除染期間を短縮**するために, 微生物学的・化学的手法を取り入れ, さらにネピアグラス茎葉部の乾物収量やセシウム吸収率を高め, 除染率を上げていくとともに, 除染試験の回数を重ねるにつれ, 土壤中の ^{40}K の減少傾向とネピアグラスの生育, 吸収率および除染率の変化を経時的に(年度ごと)に調べ, 圃場レベルでネピアグラスが ^{40}K のかわりに**Cs**をどのように吸収するかを明らかにし, 今後予定している広範囲の除染事業の指標にする.

汚染植物のバイオエタノール生産・利用可能性の検討

(共同研究者: 農学生命科学部 殿内暁生准教授)

バイオエタノール生産プロセス



手法改善によるバイオエタノール中のセシウム除去率向上

H24年度

¹³³Cs除去率(前処理→糖化→発酵→蒸留・脱水→バイオエタノールの合計)
→ **97.3%(葉)**, **98.8%(莖)**



前処理手法を改善したところ,

H25年度

ネピアグラス中のセシウム含量および前処理によるセシウム除去率

サンプル(葉)	前処理有無	Cs(mg/kg)	Cs除去率(%)
Cs無処理(0 μ M)	無	0.865	-
300 μ MCs処理	無	1650.0	-
300μMCs処理*	有	18.9	98.9

*前処理後に回収したバイオマス

前処理手法を2%NaOH, 室温で24時間の条件に改善することで, 平成24年度に比べて1.6%セシウム除去率がアップ!

今後の予定

平成
25
年度

■ 引き続き、糖化液や発酵液中でのセシウム残量およびバイオエタノール中のセシウム混入量を分析し、植物原料からバイオエタノールに混入するセシウムを完全に除去する手法の確立を目指す。

糖化過程でも試料残渣にある程度セシウムが残留すると予想され、糖化液に移行するセシウムはさらに少なくなると考えられる。

その糖化液を発酵させた発酵液にセシウムが混在したとしても蒸留で除くことが十分に可能であると予想される。

平成
26
年度
以降

■ 安定体Csの除去実験から確立した手法を用いて、平成26年度は浪江町で放射性セシウムを吸収させたネピアグラスバイオマス原料から放射性セシウムの除去し、バイオエタノール生産・利用可能性を実証する予定である。

用語

- **潜在的Cs吸収能力**:ネピアグラス一株が持っている本来の吸収能力, すなわち, 隣接する株と光, 養分, 水分などの競合がない条件下でのCs吸収能力.

- **栽植密度**:単位面積当たりの耕地への作物の植付け個体数
 - 1.0m X 1.0m=1株/m²(慣行区)
 - 0.5m X 0.5m=4株/m²(密植区)
 - 0.3m X 0.3m=11株/m²(高密植区)

- **1回刈取り(1回区)**:5月に植付けし, 10月に刈り取る年間1回だけ収穫する方式
- **2回刈取り(2回区)**:5月に植付けし, 10月の間に年間2回を収穫する方式
 - 5月に植付けし, 8月に1回目の収穫(一番草)
 - 8月の一番草の収穫後に刈り株から新しく再生する茎葉部を10月に2回目の収穫(二番草)

- **1株当たりの乾物重(kg/plant)**:ネピアグラス1個体の茎葉部乾草の重さ
- **単位面積当たりの乾物重(kg/m²)**:1m²の農地から刈り取ったすべての茎葉部乾草の重さ
- **放射性セシウム(¹³⁴Cs, ¹³⁷Cs)**:半減期はそれぞれ ¹³⁴Cs (2年), ¹³⁷Cs (30年)
- **放射性カリウム(⁴⁰K)**:天然カリウム中に0.0117 %の割合で存在し, カリウム1g当たりの放射能強度は30.4 Bq

- **ベクレル(Bq)**:1秒間あたりに原子が壊れる数(または1秒間あたりに放出される放射線の本数)を表す単位.
- **吸収率(Bq/kg)**:土壌もしくは茎葉部乾物1kgあたりに含まれているセシウムの放射能(量で表現する)

- **除染率(%)** =
$$\frac{\text{(単位面積当たりの茎葉部乾物収量 X 吸収率)}}{\text{(単位面積当たりの土壌に含まれているセシウムの総量)}} \times 100$$