

# 永年草等放射性セシウム低減技術の開発

## (平成 27 年度～平成 30 年度公共牧場実態調査)

和氣貴光、柳田知夏、沼野井憲一、斎藤憲夫<sup>1)</sup>、関口奈都美<sup>2)</sup>、斎藤栄<sup>3)</sup>

1)現 芳賀農業振興事務所、2)現 那須農業振興事務所、3)現 経営技術課

### 要 約

土壌中の放射性物質除染後の県内永年草地において、一部のほ場では牧草中放射性セシウム (RCs) が暫定許容値を上回るため、カリ資材の施用により牧草中 RCs 濃度を給与上限以下(本県設定値 50Bq/kg 以下)に低減させる技術の開発を目的に試験を実施した。

平成 27～29 年度に塩化カリ表面施用による RCs 低減効果を調査し、塩化カリのカリ成分 30kg/10a/年 (K10kg/10a を 3 回分施) 施用区において給与上限を下回る低減効果を確認した。現場への普及性を考え、同草地にて平成 28～30 年度に省力的施用方法として緩効性肥料による年 1 回表面施用の有効性を検討したところ、平成 28 及び 30 年度の二番草及び三番草において 50Bq/kg 超となるなど、年次や時季等の気象状況によっては給与上限を上回ることがあるため、緩効性肥料では実用に不適であると考えられた。

### 緒 言

平成 23 年の東日本大震災に伴う東京電力福島第一原子力発電所事故により、大気中へ多量の放射性セシウム (RCs) が放出され、東日本の広範囲に降下した<sup>1)</sup>。農地に降下した RCs は、一部作物の葉表面に付着した以外の大部分はウエザリング効果により土壌に移行し<sup>2)</sup>、栃木県では農畜産業を中心にあらゆる分野に対し混乱と被害を引き起こした。畜産における飼料分野では、自給飼料の給与及び販売や、草地の放牧利用に制限がかけられ、県北地域の一部市町では 2020 年現在も給与前 RCs 濃度検査により自粛解除とするなど、その影響が続いている。

本県では公共牧場等の永年牧草地は除染することが推奨されている<sup>3)</sup>が、傾斜や石礫等によりトラクタによる草地除染作業が困難な場合がある。このような草地では、塩化カリの表面散布により牧草中 RCs 濃度の低下が確認され<sup>4)</sup>、実際の現場で実施されている。これは、植物が RCs とカリを区別なく吸収するため<sup>5)</sup>、カリを投入することにより相対的に RCs の吸収量が少なくなったためと考えられている。

除染が可能な牧草地においては、牧草根圏の土壌中 RCs を希釈するため、表土と下層土を反転させる「天地返し」やロータリ又はハロー耕により利用が再開されている。しかしながら、一部の永年牧草地では、除染(更新)後に生産された牧草中 RCs 濃度が暫定許容値を超過する事例が認められており、問題となっている。

土壌中 RCs は深度によって濃度が異なり、遠藤ら<sup>6)</sup>は、牧草地の垂直構造を地上層(牧草)、リター(枯葉等堆積)層、ルートマット層、土壌層に区分

すると、RCs 濃度はリター層とルートマット層で全体の 94%を占めることを報告している。前述の超過事例では、除染により土壌中 RCs 濃度の低下を確認したにもかかわらず、リター層やルートマット層が徐々に分解され、内包していた RCs が遅効的に放出されたことにより許容値を再度超過したと考えられている。

塩化カリはカリ成分を 60%含み、水溶性でその効果は速効的である。これに対し、緩効性カリ肥料等の資材は、水に溶けにくい成分の使用や、粒状にした塩化カリ等を小さな穴のあいた被覆材でコーティングしたもので、被覆材の場合、その資材によって溶出期間や溶出タイプが異なるため、肥効発現の持続期間を調節することができる。その他、堆肥やケイ酸カリ(カリ成分を 20%含み、土壌中の有機酸や根が出す根酸などの薄い酸に溶けて持続的に効く性質を持つ)等も緩効性カリ肥料といえる。

我々は、これら草地における牧草中 RCs を本県の給与上限である 50Bq/kg 以下にするための施用量及び施用方法に関する試験を行った。まず塩化カリの施用量を検討し、RCs 低減に必要な十分なカリ成分量をスクリーニングした。ただし、塩化カリは比較的溶脱が速いため、過剰施肥となりやすく費用や管理労力が増加し、また肥料の流亡等の環境負荷も懸念される。そこで、緩効性カリ肥料や堆肥及びケイ酸カリといった緩効性カリ資材との併用による省力的 RCs 低減技術の開発を検討した。

## 試験Ⅰ カリ資材の施用水準の検討 材料及び方法

### (1) 調査場所

栃木県内の公共牧場のうち下記の条件を満たすほ場1か所を選定し、試験地を設置した。

- ①平成25年度に除染(更新)を実施したが、平成26年度に牧草中RCs濃度の暫定許容値超過が認められたほ場
- ②除染時にカリ資材の増肥を実施したが、翌年の土壤中交換性カリ含量が著しく低下したほ場

選定した試験地の標高は約1,260m、土壌分類は腐植質普通アロフェン質黒ボク土であった。①について、除染の工程は、プラウ耕⇒施肥・播種⇒ディスク耕⇒鎮圧であり、前草処理のための除草剤施用は行われず、平成26年度の牧草中RCs濃度は157Bq/kg(水分80%換算)であった。②について、除染時の土壤中交換性カリ含量は40mg/100g(風乾土)以上となるように施肥を行ったが、牧草収穫時の土壤中交換性カリ含量は19mg/100gであった。

なお、土壌中RCs濃度については、サンプル採取時の総平均と標準偏差は、平成27年度が256±174Bq/kg(風乾土)、平成28年度が316±275Bq/kg、平成29年度が318±248Bq/kgであった。

### (2) 試験区

施肥を行わない無施肥区のほか、カリの施肥量として4水準を設けた(表1)。

表1 試験区の施肥量

試験区	1番草 生育前	1番草 収穫後	2番草 収穫後	計
無施肥区	—	—	—	0-0-0
K15区	5-5-5	5-5-5	5-5-5	15-15-15
K30区	5-5-10	5-5-10	5-5-10	15-15-30
K45区	5-5-15	5-5-15	5-5-15	15-15-45
K60区	5-5-20	5-5-20	5-5-20	15-15-60

※表記はN-P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-K<sub>2</sub>Oの成分値kg/10a

なお、K15区は化成オール14のみを用い、K30区~K60区は塩化カリを追加することで調整した。各試験区の面積は15m<sup>2</sup>(3m×5m)で、3反復の乱塊法で配置した。

### (3) 試験期間

平成27年5月18日~平成29年度9月20日

### (4) 調査年月日

平成27年度から平成29年度(以下、H27~H29)の年度ごとに、一番草生育前土壌サンプリングを実施し、牧草が出穂期もしくは草丈40cm程度を目安に収穫時調査を実施した(表2)。

表2 調査年月日

年度	1番草 生育前	1番草 収穫時	2番草 収穫時	3番草 収穫時	4番草 収穫時
H27	5月18日	6月22日	8月11日	9月24日	—
H28	4月26日	6月8日	7月12日	8月16日	9月21日
H29	4月26日	6月6日	7月5日	8月22日	9月20日

### (5) 調査項目

#### ①牧草

RCs濃度、生草収量、乾物収量、カリウム含量、テタニー比

#### ②土壌

RCs濃度、pH、交換性カリ含量、交換性カルシウム含量、交換性マグネシウム含量

### (6) 調査方法

RCs濃度の測定は、ゲルマニウム半導体検出器を使用し、測定時間は1,000秒を最小時間とし、Cs134とCs137の濃度を合計した。測定時間は、原則としてCs134が測定可能となるまで延長したが、一部はCs137濃度からの推定値を用いた。Cs134の推定は、同時期に採取したサンプルのCs134とCs137の比が平均値と等しくなる濃度とした。

収量の調査は1m<sup>2</sup>の坪刈りとした。

ミネラルの測定は、原子吸光度法により分析した。抽出は、牧草では乾式灰化後に塩酸で、土壌は風乾後に酢酸アンモニウムで実施した。

土壌のサンプリングは、1試験区あたり2か所から深さ15cmを採取した。

## 結果及び考察

### (1) 牧草中RCs濃度

試験開始初年度であるH27の牧草中RCs濃度を表3-1に示す。一番草では無施肥と比較しK15区で減少したが、施肥量を増やしてもほとんど変化がなかった。一方、二番草以降はカリ施肥量が多いほど低い値となった。K15区及びK30区は一番草より二番草が高濃度となった。三番草ではK30~K60区において50Bq/kg未満となった。無施肥区を除く全ての試験区間で有意差は認められなかった。

表3-1 牧草中のRCs濃度(H27)

試験区	1番草 <sup>1)</sup>	2番草 <sup>1)</sup>	3番草 <sup>1)</sup>
無施肥区	141	249	147
K15区	94	147	82
K30区	92	112	48
K45区	98	95	44
K60区	80	67	24

※ 単位は、Bq/kg:水分80%換算

1) K15区~K60区において有意差無し

平成 28 年と平成 29 年の牧草中 RCs 濃度は、カリ施肥量に応じて低くなった(表 3-2 及び 3-3)。K15 区は給与上限を超過することがあったが、K30 区以上では 50Bq/kg 以下となった。多重比較検定の結果から、K30 区とそれ以上で有意差が認められないことから、カリの施肥量は 30kg/10a で十分であることが確認された。

表 3-2 牧草中の RCs 濃度 (平成 28 年)

試験区	1 番草 <sup>1)</sup>	2 番草 <sup>1)</sup>	3 番草 <sup>1)</sup>	4 番草 <sup>1)</sup>
無施肥区	131	149	206	180
K15区	61 <sup>a</sup>	80 <sup>a</sup>	119 <sup>a</sup>	127 <sup>a</sup>
K30区	33 <sup>ab</sup>	31 <sup>ab</sup>	42 <sup>b</sup>	45 <sup>b</sup>
K45区	25 <sup>ab</sup>	23 <sup>b</sup>	30 <sup>b</sup>	29 <sup>b</sup>
K60区	14 <sup>b</sup>	14 <sup>b</sup>	15 <sup>b</sup>	18 <sup>b</sup>

※ 単位は、Bq/kg:水分80%換算  
1) 異符号間に5%水準で有意差あり

表 3-3 牧草中の RCs 濃度 (平成 29 年)

試験区	1 番草 <sup>1)</sup>	2 番草 <sup>1)</sup>	3 番草 <sup>1)</sup>	4 番草 <sup>1)</sup>
無施肥区	160	157	164	180
K15区	46 <sup>a</sup>	63 <sup>a</sup>	61 <sup>a</sup>	85 <sup>a</sup>
K30区	16 <sup>b</sup>	20 <sup>b</sup>	21 <sup>ab</sup>	30 <sup>b</sup>
K45区	13 <sup>b</sup>	15 <sup>b</sup>	8 <sup>b</sup>	31 <sup>b</sup>
K60区	10 <sup>b</sup>	9 <sup>b</sup>	5 <sup>b</sup>	13 <sup>b</sup>

※ 単位は、Bq/kg:水分80%換算  
1) 異符号間に5%水準で有意差あり

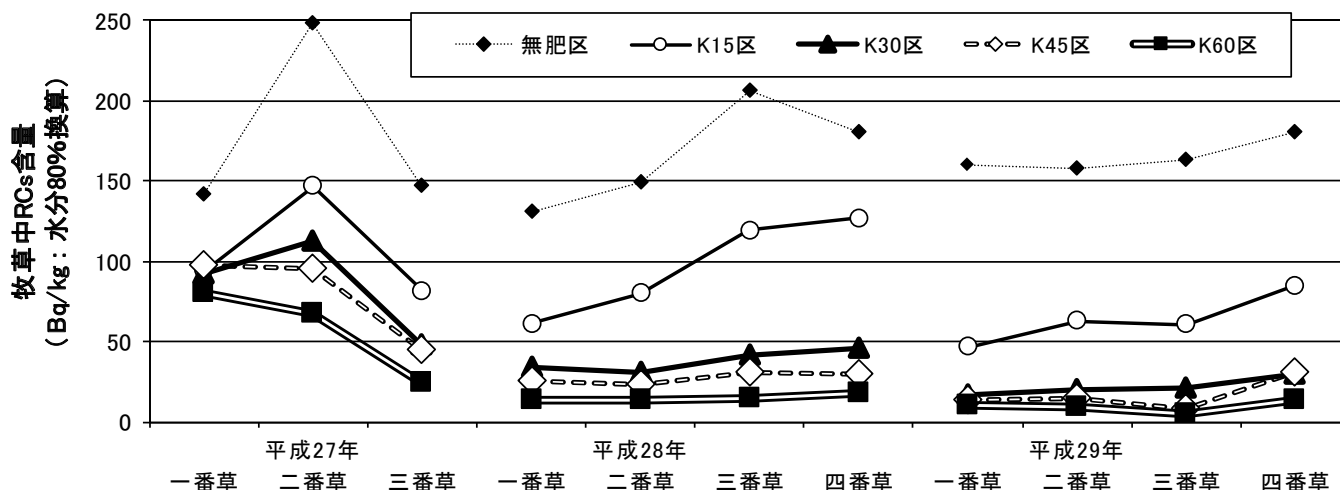


図 1 牧草中の RCs 濃度の推移

3 年間の牧草中 RCs 濃度推移を図 1 に示した。無施肥区において、全ての牧草が飼料の暫定許容値である 100Bq/kg (水分 80%換算) を超過したことにに対し、施肥を行った試験区では明らかな低下がみられた。また、カリの施肥量が多いほど牧草中 RCs 濃度が低くなる傾向であったことから、牧草中 RCs 濃度の低減のためにはカリの増肥が有効であることが再確認された。

試験区ごとの推移をみると、施肥を行った試験区では年度の経過により牧草中 RCs 濃度が低下する傾向がみられたが、無施肥区では年度が経過しても同程度の水準であった。

(2) 土壌中 RCs 濃度

5 水準×3 反復の試験区について、①から⑮の区番に配置した(図 2)。



図 2 試験区の配置

それぞれの区番について、試験期間全体を通じて、土壌採取を 14 回 (H27: 4 回、H28: 5 回、H29: 5 回) 実施したが、土壌中 RCs 濃度のバラツキが非常に大きかった(表 4)。

表 4 試験地の土壤中 RCs 濃度 (Bq/kg 乾土)

区番	平均値±標準偏差
①	394 ± 316
②	225 ± 190
③	274 ± 127
④	255 ± 164
⑤	273 ± 160
⑥	180 ± 158
⑦	116 ± 113
⑧	393 ± 349
⑨	293 ± 153
⑩	426 ± 276
⑪	243 ± 284
⑫	391 ± 262
⑬	295 ± 208
⑭	423 ± 209
⑮	298 ± 245

※単位は、Bq/風乾土kg

この原因として、除染時にリター層やルートマット層がプラウによって地下 10~30cm 程度に斜めにすき込まれたまま残っており、土壌採取時におけるこれら混入量の多寡によって変動幅が大きくなったと考えられた。



図 3 採取土壌中の前植生層 (平成 29 年撮影)

### (3) 移行係数

土壌から牧草への移行係数(牧草中 RCs/土壌中 RCs)の算出方法として、本来は牧草収穫と同時に採取した土壌中 RCs 濃度を用いる。しかしながら、前述の理由により本試験では生育前及び各番草の平均値を用い、採取日からの減衰補正を行って移行係数とした。

平成 27 年の移行係数は、いずれの番草においても、カリ投入量が多いほど移行係数が低くなる傾向が認められたが、5%水準で有意差は認められなかった(表 5-1)。

表 5-1 牧草への RCs の移行係数 (H27)

試験区	1番草 <sup>1)</sup>	2番草 <sup>1)</sup>	3番草 <sup>1)</sup>
無施肥区	0.709	1.291	0.731
K15区	0.451	0.717	0.406
K30区	0.377	0.515	0.222
K45区	0.457	0.452	0.213
K60区	0.301	0.270	0.093

1) K15区~K60区において有意差無し

平成 28 年は、無施肥区と比較しカリ投入区で顕著に低下し、三番草及び四番草では投入量が多いほど移行係数が低かった(表 5-2)。

表 5-2 牧草への RCs の移行係数 (H28)

試験区	1番草 <sup>1)</sup>	2番草 <sup>1)</sup>	3番草 <sup>2)</sup>	4番草 <sup>2)</sup>
無施肥区	0.898	1.025	1.406	1.228
K15区	0.175	0.231	0.344 <sup>a</sup>	0.366 <sup>a</sup>
K30区	0.115	0.107	0.150 <sup>ab</sup>	0.162 <sup>ab</sup>
K45区	0.118	0.114	0.147 <sup>ab</sup>	0.144 <sup>b</sup>
K60区	0.038	0.038	0.040 <sup>b</sup>	0.050 <sup>b</sup>

1) K15区~K60区において有意差無し

2) 異符号間に5%水準で有意差あり

平成 29 年も平成 28 年と同様、カリ投入量が多いほど移行係数が低くなった(表 5-3)。

表 5-3 牧草への RCs の移行係数 (H29)

試験区	1番草 <sup>2)</sup>	2番草 <sup>2)</sup>	3番草 <sup>1)</sup>	4番草 <sup>2)</sup>
無施肥区	0.564	0.570	0.576	0.645
K15区	0.223 <sup>a</sup>	0.311 <sup>a</sup>	0.310	0.410 <sup>a</sup>
K30区	0.053 <sup>b</sup>	0.064 <sup>ab</sup>	0.072	0.099 <sup>ab</sup>
K45区	0.054 <sup>b</sup>	0.053 <sup>ab</sup>	0.037	0.150 <sup>ab</sup>
K60区	0.028 <sup>b</sup>	0.025 <sup>b</sup>	0.014	0.036 <sup>b</sup>

1) K15区~K60区において有意差無し

2) 異符号間に危険率5%で有意差あり

### (3) 牧草収量

牧草収量は、試験期間中いずれの年次においても無施肥区を除く区間でのカリ施肥量による有意差は認められなかった(表 6、表 7)

表 6 牧草の生草収量 (kg/10a)

試験区	H27			H28				H29			
	1番草	2番草	3番草	1番草	2番草	3番草	4番草	1番草	2番草	3番草	4番草
無施肥区	829	720	410	626	948	454	741	363	257	670	250
K15区	1,473	1,125	945	1,140	1,994	1,944	997	1,073	1,220	1,850	433
K30区	1,615	1,165	1,001	1,242	2,265	2,279	1,123	1,160	1,037	2,090	430
K45区	1,654	1,381	889	1,487	2,085	2,261	962	1,107	1,100	2,213	373
K60区	1,591	1,134	979	1,345	2,033	2,205	1,225	1,137	1,080	2,080	390

表 7 牧草の乾物収量 (kg/10a)

試験区	H27			H28				H29			
	1番草	2番草	3番草	1番草	2番草	3番草	4番草	1番草	2番草	3番草	4番草
無施肥区	153	169	90	135	226	95	95	88	44	114	47
K15区	215	202	153	201	306	233	111	203	157	204	75
K30区	226	209	159	209	328	257	119	212	130	228	70
K45区	253	241	155	254	322	255	107	212	177	254	67
K60区	237	206	165	229	328	254	133	214	134	234	70

## (4) 牧草中のカリウム含量及びピタニー比

牧草中カリウム含量は、カリの投入量に応じ高くなる傾向が認められた。有意差が認められる場合 (H28 の三番草、H29 の一番草及び三番草) もあり、それらは全て K15 区とそれ以上とで分かれる結果となった (表 8-1 から 8-3)。

表 8-1 牧草中のカリウム含量 (DM%) (H27)

試験区	1番草 <sup>1)</sup>	2番草 <sup>1)</sup>	3番草 <sup>1)</sup>
無施肥区	2.91	2.71	3.05
K15区	2.72	3.36	4.16
K30区	3.36	3.62	4.41
K45区	3.26	3.65	4.21
K60区	3.52	3.66	4.39

1) K15区～K60区において有意差無し

表 8-2 牧草中のカリウム含量 (DM%) (H28)

試験区	1番草 <sup>1)</sup>	2番草 <sup>1)</sup>	3番草 <sup>2)</sup>	4番草 <sup>1)</sup>
無施肥区	1.83	2.31	3.11	2.70
K15区	2.83	3.68	3.46 <sup>b</sup>	3.12
K30区	2.82	4.35	4.50 <sup>a</sup>	3.39
K45区	3.14	4.19	4.44 <sup>a</sup>	3.89
K60区	3.27	4.07	4.64 <sup>a</sup>	3.95

1) K15区～K60区において有意差無し

2) 異符号間に5%水準で有意差あり

表 8-3 牧草中のカリウム含量 (DM%) (H29)

試験区	1番草 <sup>2)</sup>	2番草 <sup>1)</sup>	3番草 <sup>2)</sup>	4番草 <sup>1)</sup>
無施肥区	2.35	3.06	2.69	2.26
K15区	2.59 <sup>b</sup>	4.43	3.43 <sup>b</sup>	2.89
K30区	3.57 <sup>a</sup>	5.13	4.34 <sup>a</sup>	4.12
K45区	3.68 <sup>a</sup>	4.96	4.32 <sup>a</sup>	3.69
K60区	3.78 <sup>a</sup>	5.91	4.42 <sup>a</sup>	3.80

1) K15区～K60区において有意差無し

2) 異符号間に5%水準で有意差あり

永年草等放射性セシウム低減技術の開発

牧草中テタニー比は、カリの投入量に応じて高くなる傾向が認められた。平成 27 年は有意差が認められなかったものの、平成 28 年及び平成 29 年は全ての番草で有意差が認められ、概ね K15 区とそれ以上とに分けられる結果となった（表 9-1 から 9-3）。

表 9-1 牧草中のテタニー比 (H27)

試験区	1番草 <sup>1)</sup>	2番草 <sup>1)</sup>	3番草 <sup>1)</sup>
無施肥区	2.43	2.13	2.12
K15区	2.31	2.63	3.05
K30区	2.92	3.02	3.51
K45区	3.13	3.22	3.73
K60区	3.43	3.56	3.90

1) K15区～K60区において有意差無し

表 9-2 牧草中のテタニー比 (H28)

試験区	1番草 <sup>1)</sup>	2番草 <sup>1)</sup>	3番草 <sup>1)</sup>	4番草 <sup>1)</sup>
無施肥区	1.57	2.03	1.74	1.97
K15区	2.37 <sup>b</sup>	3.41 <sup>b</sup>	2.18 <sup>b</sup>	2.56 <sup>b</sup>
K30区	2.92 <sup>ab</sup>	3.72 <sup>ab</sup>	4.23 <sup>a</sup>	2.98 <sup>b</sup>
K45区	3.94 <sup>a</sup>	4.91 <sup>ab</sup>	5.15 <sup>a</sup>	3.81 <sup>a</sup>
K60区	3.94 <sup>a</sup>	5.32 <sup>a</sup>	5.61 <sup>a</sup>	4.19 <sup>a</sup>

1) 異符号間に5%水準で有意差あり

表 9-3 牧草中のテタニー比 (H29)

試験区	1番草 <sup>1)</sup>	2番草 <sup>1)</sup>	3番草 <sup>1)</sup>	4番草 <sup>1)</sup>
無施肥区	1.70	1.96	1.92	1.50
K15区	2.64 <sup>b</sup>	3.91 <sup>b</sup>	3.35 <sup>b</sup>	2.41 <sup>b</sup>
K30区	4.00 <sup>a</sup>	5.26 <sup>ab</sup>	4.65 <sup>a</sup>	4.05 <sup>a</sup>
K45区	4.64 <sup>a</sup>	6.05 <sup>a</sup>	5.34 <sup>a</sup>	4.50 <sup>a</sup>
K60区	4.66 <sup>a</sup>	6.44 <sup>a</sup>	5.32 <sup>a</sup>	4.62 <sup>a</sup>

1) 異符号間に危険率5%で有意差あり

(5) 土壌中の交換性カリ含量

土壌中交換性カリ含量は、生育前（施肥前）は概ね 10mg/100g 乾土程度であった。施肥後はある程度の増加が認められ、その効果は年度によって大きく異なった。H28 は施用効果が高い一方、H27 及び H29 は変化が小さく、またカリ投入量に対し上昇幅はほとんど変わらなかった（表 10-1 から表 10-3）。

表 10-1 土壌中の交換性カリ含量 (mg/100g 乾土) (H27)

試験区	生育前 <sup>1)</sup>	1番草 <sup>1)</sup>	2番草 <sup>1)</sup>	3番草 <sup>1)</sup>
無施肥区	19.2	9.0	9.8	12.8
K15区	6.7	10.6	8.0	10.7
K30区	8.4	14.7	13.3	11.1
K45区	9.8	10.8	11.0	17.8
K60区	5.6	14.6	11.3	17.1

1) K15区～K60区において有意差無し

表 10-2 土壌中の交換性カリ含量 (mg/100g 乾土) (H28)

試験区	生育前 <sup>1)</sup>	1番草 <sup>1)</sup>	2番草 <sup>1)</sup>	3番草 <sup>2)</sup>	4番草 <sup>1)</sup>
無施肥区	10.0	13.5	12.4	9.3	12.6
K15区	8.1	14.5	8.5	11.1 <sup>b</sup>	6.7
K30区	9.2	15.6	17.0	11.4 <sup>b</sup>	10.1
K45区	11.1	24.2	17.0	19.9 <sup>ab</sup>	12.4
K60区	8.7	18.1	18.9	23.8 <sup>a</sup>	11.6

1) K15区～K60区において有意差無し

2) 異符号間に5%水準で有意差あり

表 10-3 土壌中の交換性カリ含量 (mg/100g 乾土) (H29)

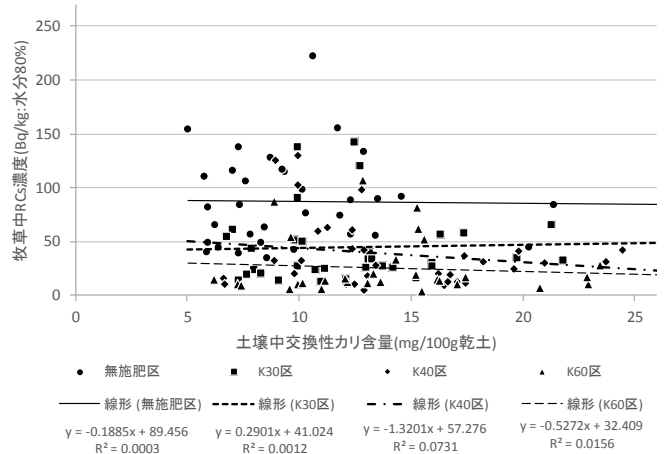
試験区	生育前 <sup>1)</sup>	1番草 <sup>1)</sup>	2番草 <sup>1)</sup>	3番草 <sup>1)</sup>	4番草 <sup>1)</sup>
無施肥区	11.6	10.7	10.4	9.4	8.7
K15区	7.8	7.4	15.8	7.5	7.1
K30区	10.3	9.4	11.1	10.3	9.9
K45区	9.5	12.0	16.4	12.0	11.4
K60区	11.1	11.4	12.8	12.0	13.2

1) K15区～K60区において有意差無し

(6) 土壌中交換性カリ含量と牧草中 RCs 濃度との関係

土壌中カリ含量が高いほど牧草中 RCs 濃度が減少する逆相関の関係があることがわかった。特に、土壌中交換性カリ含量が 15mg/100g 風乾土以上の場合、施肥区においては牧草中 RCs 濃度が暫定許容値を超過する事例は無かった (図 4)。

このことから、本試験地において、土壌中交換性カリ含量を 15mg/100g 風乾土以上に保つことが牧草中 RCs 濃度低減の指標となると考えられた。



試験Ⅱ 緩効性カリ資材による省力的 RCs 低減技術の検討

材料及び方法

(1) 調査場所

試験 1 に同じ。

(2) 試験区は表 11 のとおり。

(3) 供試資材

① 緩効性資材

平成 28 年度 直線型 40 日タイプ

平成 29 年度 直線型 70 日タイプ

平成 30 年度 直線型 70 日タイプ

② 副資材

牛ふん堆肥 2 t/10a

ケイ酸カリ 10kg/10a

各資材のカリ含有量は牛ふん堆肥が現物

1t 当たり有効成分量 13.1kg (県施肥基

準)、ケイ酸カリが 20%である。

(4) 試験期間

平成 28 年度：4 月 26 日～9 月 21 日

平成 29 年度：5 月 11 日～9 月 27 日

平成 30 年度：5 月 1 日～9 月 27 日

図 4 土壌中交換性カリ含量と牧草中 RCs 濃度との関係

(5) 調査年月日

表 11 のとおり。

実施年度	一番草	二番草	三番草	四番草
H28	6/2	7/5	8/16	9/21
H29	6/15	7/11	8/29	9/27
H30	6/12	7/18	8/21	9/27

(6) 調査項目

牧草：RCs 濃度、生草収量、乾物収量、ミネラル (K, Mg, Ca) 含量

土壌：RCs 濃度、交換性カリ含量

表 11 各試験区において施用した資材名と施用量 (N-P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-K<sub>2</sub>O の成分値 kg/10a)

試験区	実施年度	資材名	施用量			
			生育前	1 番草 収穫後	2 番草 収穫後	計
塩化カリ区	H28～H30	資材計 (化成オール14) (塩化カリ)	3.3-3.3-10 (3.3-3.3-3.3) (0-0-6.7)	3.3-3.3-10 (3.3-3.3-3.3) (0-0-6.7)	3.3-3.3-10 (3.3-3.3-3.3) (0-0-6.7)	10-10-30 (10-10-10) (0-0-20)
	H28	資材計 (緩効性肥料) (塩化カリ)	10-7.9-15 (10-7.9-9.3) (0-0-5.7)	-	0-0-15 (0-0-15)	10-7.9-30 (10-7.9-9.3) (0-0-20.7)
緩効性カリ区	H29	資材計 (緩効性肥料) (塩化カリ)	10-5-30 (10-5-10) (0-0-20)	-	-	10-5-30 (10-5-10) (0-0-20)
	H30	資材計 (緩効性肥料) (塩化カリ)	10-10-30 (10-10-20) (0-0-10)	-	-	10-10-30 (10-10-20) (0-0-10)

※緩効性肥料は、H28が直線型40日タイプ、H29及びH30が直線型70日タイプを用いた

(7) 調査方法

牧草は各試験区あたり 2m<sup>2</sup> の範囲を刈り高 5 cm で収穫した。収穫物は生草重量を測定したのち、60℃通風乾燥機により 48 時間処理し乾物率を算出した。

土壌は採土器により地表から地下 20cm を採取した。RCs の測定は、牧草はゲルマニウム半導体検出器により乾草を 1L 容器に充填し、測定時間 2,000~3,000 秒で、土壌は NaI シンチレーション検出器により乾土を 350ml 容器に充填し測定時間 900 秒で測定した。ミネラル含量は原子吸光分析法 (HITACHI) により測定した。

**結果**

(1) 平成 28 年度試験

牧草中 RCs 濃度について、緩効性肥料の施肥は二番草及び三番草で給与上限 50Bq/kg を超過し、また塩化カリの施肥と比較して抑制効果は低かった。堆肥区は一番草から四番草まで全て無施肥と比較して低く、給与上限を下回り、抑制効果の可能性が示唆された。一方、ケイ酸カリ区は無施肥区と同等で抑制効果はみられなかった (表 12)。

牧草の収量について、塩化カリ区と緩効性区とで有意差は認められなかった (表 13)。

土壌中の交換性カリ含量について、緩効性カリ区の一、三、四番草収穫時は塩化カリ区より高い値であったが、標準誤差が大きく有意差は認められなかった (表 14)。

[次年度試験での改善点等]

緩効性カリ区の牧草中 RCs 濃度は番草によって給与上限の超過が見られたものの、一定の低減効果が認められた。そこで、気象条件の違いによる効果量の変動を確認することとした。また、緩効性カリ区では二番草収穫時に塩化カリを追肥する設定であったが、この時期 (7月上旬) は放牧期間中にあたることから、現場での運用は困難である。そこで、放牧前に 1 回で全量施用する体系での効果を検証することとした。

堆肥及びケイ酸カリについては、緩効性カリより肥効が長く単年での判断はできないため、連年施用による検証を行うこととした。

(2) 平成 29 年度試験

牧草中 RCs 濃度について、緩効性肥料区は塩化カリ区と比較して抑制効果が劣っていたが、給与可能上限を超過することはなかった。ケイ酸カリは低減効果がほとんど認められず、全番草において 50Bq/kg を超過した。一方、堆肥区は低減効果が認められたが、二番草では 47Bq/kg と給与上限に近い値となることもあった (表 15)。

牧草の収量について、番草により差は大きいものの、塩化カリ区と緩効性肥料区とで有意差は認

められなかった (表 16)。

土壌中交換性カリ含量について、緩効性カリ区と塩化カリ区で有意差は認められなかった。堆肥区の二番草及び三番草で高かった (表 17)。

牧草中のカリ含量とテタニー比については、ケイ酸カリ区で無施肥区と同等に低く、それ以外の区では無施肥区より高かった。これらの区ではいずれも一番草から三番草まで、グラステタニーの発生が懸念されるテタニー比 2.2 を上回った。ただし、いずれも区に有意差は認められなかった (表 18)。

[次年度試験での改善点等]

無施肥区における牧草中 RCs 濃度は一番草より二番草及び三番草の方が高くなる傾向が認められ、これは平成 28 年度と同様であったことから、二番草及び三番草の時期にカリ成分の溶出がピークとなるよう、緩効性カリ資材の配分を増やすこととした。

ケイ酸カリ及び堆肥単独では牧草中 RCs 濃度低減効果が十分とはいえないため、緩効性肥料との組み合わせについて検討を行うこととした。

(3) 平成 30 年度試験

牧草中 RCs 濃度について、緩効性カリ区は一定の低減効果が認められたものの、塩化カリ区と比較して抑制効果が低い傾向であった。特に、二番草及び三番草では給与上限である 50Bq/kg 超で、堆肥及びケイ酸カリとの併用でも同様であった (表 19)。

牧草の収量について、緩効性カリ区と塩化カリ区とで有意な差はなかった。堆肥の施用は増収効果が認められ、特に一番草で顕著であった (表 20)。

土壌中交換性カリ濃度については、区間のバラツキが大きかったものの、塩化カリ区及び堆肥区で高い傾向が認められた (表 21)。牧草中テタニー比について、緩効性カリ区は塩化カリ区と比較して二番草以降で有意に低い値であった (表 22)。

**考察**

本試験は 3 カ年間で計 3 回実施したが、緩効性カリ区と称した試験区は年度により条件が異なっている。例えば、年度ごとに異なる資材を投入したこと、塩化カリとの配分割合が異なること、リン酸成分の施用量が異なること等である。そのため各試験区の RCs 低減効果については通常、単年毎でしか評価できない。しかしながら、土壌中交換性カリ含量について 3 カ年の推移を観察すると、年々減少する傾向が認められる (図 5)。このことは牧草生育前に処理した塩化カリ及び緩効性カリ資材が年度内にほぼ全て溶出し、カリの吸収および流亡が進んでいるといえる (堆肥区及びケイ酸カリ区は除く)。よ



って、前年の資材投入の効果は翌年に影響していないため、3カ年分の推移として各資材の効果を考察してみることにする。

緩効性カリ区は、平成28年の二番草以外の全ての年次、番草で無施肥区よりRCs濃度が低かったことから、一定の低減効果があると考えられた。しかし、いずれの年次も塩化カリ3回分施より高く、平成29年以外の二番草及び三番草で50Bq/kgを超過したことから、塩化カリ分施ほどの低減効果はなく実用的ではない(図6)。

緩効性カリの牧草中RCsが年次によって異なる要因として、気象推移の年次差異とそれによる牧草生育量の増減が考えられる。例えば、平成30年の気象概況は、梅雨明けが早く、夏季の日最高気温が度々30℃を超えるなど(データ省略)、平均気温が高く推移した。そのため牧草の生育が旺盛となり

(二番及び三番草の乾物収量は平成28年比115%、平成29年比128%)カリ要求量が増加する結果となった(表23及び図7)。一方で、緩効性カリ資材の溶出量が充足しない、もしくは溶出ピークと合致せず、RCs低減に十分なカリが供給されなかったのではないかと考えられた。また、気温の上昇は地温の上昇をもたらし、リター層やルートマット層の分解速度も速まり、吸着されていたRCsの放出も増加したと考えられる。

放射性物質関連ではないが、山田<sup>7)</sup>は、傾斜放牧地における施肥の省力化と省資源化を可能とする新たな施肥法として、シグモイド型被覆尿素40日タイプと即効性尿を窒素成分1:1で施用する手法を提唱している。この手法をRCs低減に応用し、緩効性カ

リ区においても塩化カリを一定量施用して試験を行った。そのため一番草ではいずれの年次も給与水準を下回ることができた。しかしその後、緩効性カリが効果を発揮すべき二番あるいは三番草において低減効果は不十分であった。緩効性窒素肥料は推定溶出曲線の計算式が確立されており、温度依存的に溶出が進むことがわかっている。一方、緩効性カリ肥料は窒素より溶出が遅くなることがわかっているものの、計算式がないため予測が難しい。結果として、ある程度気象条件が異なっても十分RCs濃度を低減できる最適な資材としての選定には至らなかった。

今回の原子力発電所事故においてRCsは<sup>134</sup>Cs(半減期2.1年)と<sup>137</sup>Cs(同30.2年)から構成され、事故当時の両者の存在比はほぼ1:1であった<sup>1)</sup>。令和元年8月時点で理論上、前者は約6.0%まで減少しているのに対し、後者は約82.3%残存している計算になる。これまでの除染事業は<sup>134</sup>Csの比較的速い自然崩壊との相乗効果により優れた成果をあげ、県内の利用制限も解除が進んできた。しかし、壊変速度の遅い<sup>137</sup>Csが主体になった今後は、RCsの自然減少は期待できず、逆にリター層等からのRCs放出によって土壤中RCs濃度は高まるおそれがある。よって、今後もカリの施用は必要であり、より実用的な施用法の開発が望まれる。

本研究における調査地はオーチャードグラス主体の永年牧草地であった。牧草は他の作目に比べ移行係数が高い傾向があるが<sup>8)</sup>、草種間差や、土壌条件等によって異なることが報告されている<sup>9)10)</sup>。他の牧草地においては、このことに留意して資材の選定や施用量の検討を行う必要があると考えられる。

表12 牧草中RCs濃度及び移行係数の推移(平成28年度)

試験区	RCs濃度(Bq/kg:水分80%換算)				移行係数			
	1番草	2番草	3番草	4番草	1番草	2番草	3番草	4番草
緩効性区	41	58	54	28	0.08	0.20	0.34	0.08
塩化カリ区	32	37	30	15	0.12	0.31	0.17	0.08
堆肥区	10	23	39	21	-	-	-	-
ケイ酸カリ区	43	72	78	49	-	-	-	-
無施肥区	44	48	85	58	-	-	-	-

表13 牧草の生草収量と乾物収量の推移(平成28年度)

試験区	生草収量(kg/10a)				乾物収量(kg/10a)			
	1番草	2番草	3番草	4番草	1番草	2番草	3番草	4番草
緩効性区	1,598	2,257	2,079	1,327	285	252	244	126
塩化カリ区	1,690	2,216	2,383	1,299	311	237	270	122

表14 土壤中交換性カリ含量(mg/100g乾土)の推移(平成28年度)

試験区	生草収量(kg/10a)				
	1番草生育前	1番草	2番草	3番草	4番草
緩効性区	13.0	22.7	17.0	24.3	16.6
塩化カリ区	14.1	18.0	19.6	17.1	14.7

永年草等放射性セシウム低減技術の開発

表15 牧草中RCs濃度及び移行係数の推移(平成29年度)

試験区	RCs濃度(Bq/kg:水分80%換算)				移行係数			
	1番草	2番草	3番草	4番草	1番草	2番草	3番草	4番草
緩効性区	15	43	31	31	0.06	0.17	0.13	0.13
塩化カリ区	7	17	13	24	0.03	0.09	0.07	0.12
堆肥区	20	47	39	35	0.04	0.10	0.08	0.07
ケイ酸カリ区	60	72	62	61	0.19	0.23	0.20	0.19
無施肥区	48	66	97	72	0.10	0.13	0.20	0.15

表16 牧草の生草収量と乾物収量の推移(平成29年度)

試験区	生草収量(kg/10a)				乾物収量(kg/10a)			
	1番草	2番草	3番草	4番草	1番草	2番草	3番草	4番草
緩効性区	2,020	1,135	1,775	565	259	166	279	80
塩化カリ区	1,465	1,305	1,585	540	220	186	271	79
堆肥区	1,770	1,390	1,560	880	232	212	276	123
ケイ酸カリ区	1,720	1,400	1,430	570	253	211	287	89
無施肥区	-	-	-	-	-	-	-	-

表17 土壌中交換性カリ含量(mg/100g乾土)の推移(平成29年度)

試験区	1番草生育前	1番草	2番草	3番草	4番草
緩効性区	12.4	16.6	17.2	15.1	11.7
塩化カリ区	12.6	14.5	15.4	12.7	11.2
堆肥区	11.1	28.7	33.8	11.0	9.0
ケイ酸カリ区	11.2	7.4	8.7	17.0	7.6
無施肥区	9.8	13.3	10.2	7.7	9.7

表18 牧草中カリ含量とテタニ一比推移(平成29年度)

試験区	牧草中カリ含量(DM%)				テタニ一比			
	1番草	2番草	3番草	4番草	1番草	2番草	3番草	4番草
緩効性区	4.1	4.7	4.2	3.6	3.3	3.1	3.0	1.9
塩化カリ区	3.6	4.8	4.0	3.5	2.9	3.5	3.1	2.0
堆肥区	4.5	4.5	3.6	3.4	3.7	3.4	2.5	2.0
ケイ酸カリ区	2.7	3.2	2.7	2.3	1.9	1.8	1.6	1.1
無施肥区	2.3	2.5	2.4	2.2	1.5	1.3	1.8	0.9

表19 牧草中RCs濃度及び移行係数の推移(平成30年度)

資材名		RCs濃度(Bq/kg:水分80%換算) <sup>1)</sup>				土壌から牧草への移行係数 <sup>2)</sup>			
主資材	副資材	1番草	2番草	3番草	4番草	1番草	2番草	3番草	4番草
緩効性カリ	なし	27.8	58.6	54.5	22.6	0.10	0.18	0.16	0.07
塩化カリ	なし	18.2	24.5	24.1	20.1	0.07	0.11	0.12	0.09
緩効性カリ	堆肥	16.4	47.8	56.4	12.7	0.05	0.13	0.15	0.04
塩化カリ	堆肥	19.3	49.2	60.9	13.9	0.06	0.13	0.16	0.04
緩効性カリ	ケイ酸カリ	30.9	72.3	67.8	30.5	0.14	0.33	0.32	0.14
塩化カリ	ケイ酸カリ	15.9	38.3	27.6	17.3	0.06	0.15	0.10	0.06
なし	なし	61.5	102.6	86.8	68.3	0.22	0.37	0.31	0.25
要因	主資材	0.106	0.075 <sup>†</sup>	0.053 <sup>†</sup>	0.527	0.085 <sup>†</sup>	0.044 <sup>*</sup>	0.028 <sup>*</sup>	0.511
	副資材	0.642	0.563	0.202	0.162	0.112	0.081 <sup>†</sup>	0.169	0.068 <sup>†</sup>
	交互作用	0.195	0.415	0.183	0.291	0.146	0.193	0.140	0.149

1) 採取日時での補正值を使用

2) 移行係数 = 牧草中RCs(水分80%換算) / 土壌中RCs

†: 10%水準、\*: 5%水準でそれぞれ有意差あり

表20 牧草の乾物収量推移（平成30年度）

資材名		乾物収量 (kg/10a)				
主資材	副資材	1番草	2番草	3番草	4番草	計
緩効性カリ	なし	262	265	231	74	831
塩化カリ	なし	176	249	338	88	851
緩効性カリ	堆肥	364	252	293	99	1,008
塩化カリ	堆肥	372	280	376	85	1,113
緩効性カリ	ケイ酸カリ	224	222	248	84	779
塩化カリ	ケイ酸カリ	234	236	300	95	865
なし	なし	217	202	144	85	648
要因	主資材	0.843	0.178	0.023*	0.504	0.049*
	副資材	0.011*	0.262	0.160	0.343	0.002**
	交互作用	0.852	0.926	0.872	0.227	0.939

\* : 5%水準、\*\* : 1%水準でそれぞれ有意差あり

表21 土壌中交換性カリ濃度 (mg/100g乾土) の推移（平成30年度）

資材名		番草				
主資材	副資材	生育前	1番草	2番草	3番草	4番草
緩効性カリ	なし	9.1	9.5	13.6	9.6	10.1
塩化カリ	なし	12.3	12.9	15.7	10.1	11.3
緩効性カリ	堆肥	12.1	18.3	19.9	8.6	19.4
塩化カリ	堆肥	27.3	19.2	16.8	8.8	14.6
緩効性カリ	ケイ酸カリ	8.4	7.9	9.5	10.2	9.9
塩化カリ	ケイ酸カリ	15.0	7.9	14.8	10.0	9.7
なし	なし	10.0	11.4	8.2	6.6	11.2
要因	主資材	0.074 <sup>†</sup>	0.870	0.560	0.044*	0.889
	副資材	0.066 <sup>†</sup>	0.084 <sup>†</sup>	0.372	0.156	0.036*
	交互作用	0.257	0.899	0.615	0.873	0.438

<sup>†</sup> : 10%水準、\* : 5%水準でそれぞれ有意差あり

表22 牧草中カリ含量とテタニー比推移（平成30年度）

資材名		牧草中カリ含量 (DM%)				テタニー比			
主資材	副資材	1番草	2番草	3番草	4番草	1番草	2番草	3番草	4番草
緩効性カリ	なし	2.6	4.1	3.8	4.7	2.0	2.9	2.5	3.4
塩化カリ	なし	2.6	4.5	4.5	4.8	2.2	3.5	3.1	3.6
緩効性カリ	堆肥	3.0	4.1	3.9	4.2	2.2	2.8	2.5	2.7
塩化カリ	堆肥	2.8	4.7	4.2	4.8	2.4	3.4	2.7	3.2
緩効性カリ	ケイ酸カリ	2.5	3.6	3.3	4.0	1.5	2.5	1.9	2.6
塩化カリ	ケイ酸カリ	2.5	4.3	3.9	4.6	2.1	3.3	3.0	3.3
なし	なし	1.6	1.9	2.1	2.5	1.0	1.1	1.0	1.5
要因	主資材	0.649	0.075 <sup>†</sup>	0.029*	0.045*	0.174	0.035*	0.037*	0.040*
	副資材	0.090 <sup>†</sup>	0.365	0.134	0.177	0.317	0.583	0.518	0.085 <sup>†</sup>
	交互作用	0.612	0.859	0.748	0.441	0.667	0.965	0.489	0.547

<sup>†</sup> : 10%水準、\* : 5%水準でそれぞれ有意差あり

永年草等放射性セシウム低減技術の開発

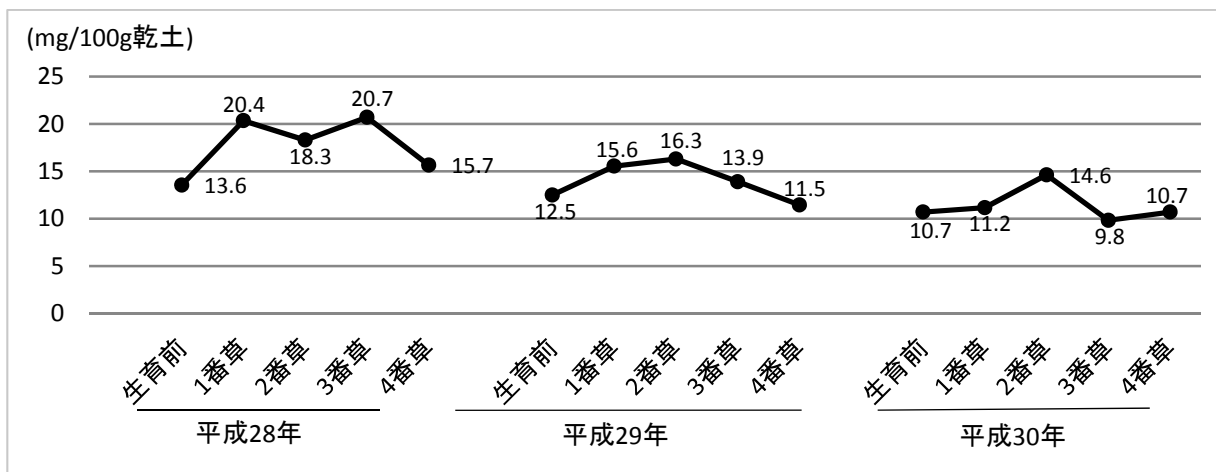


図5 各年次における土壤中交換性カリ含量の推移

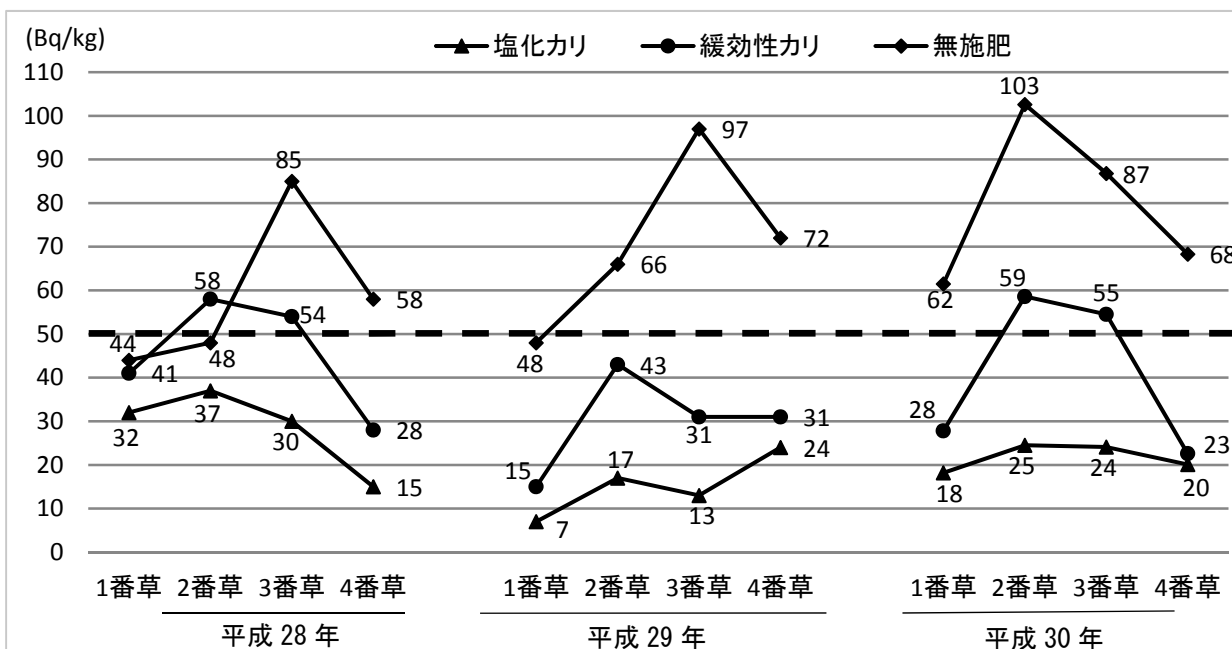


図6 各年次における牧草中RCs濃度の推移

表23 各年次の2番草及び3番草におけるカリ収奪量(塩化カリ区)

項目	H28		H29		H30	
	2番草	3番草	2番草	3番草	2番草	3番草
乾物収量 (kg/10a)	237	270	186	271	249	338
牧草中カリ含量 (DM%)	4.7	4.8	4.8	4.0	4.5	4.5
カリ収奪量 (kg/10a)	11.1	13.0	8.9	10.8	11.2	15.2

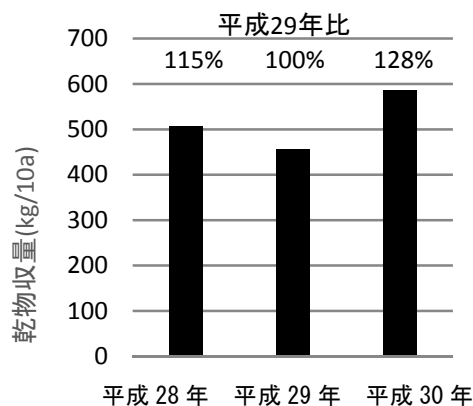


図7 各年次の塩化カリ区における2番草及び3番草の合計乾物収量

## 総括

永年牧草地の RCs 低減対策として、塩化カリによる成分 30kg/10a 施用（3 回分施）が有効であった。緩効性カリは一定の効果はあるものの、今回供試した資材では、本県の給与上限 50Bq/kg を安定して下回することはできなかった。

## 引用文献

- 1) 日本原子力研究開発機構. 2011. 放射線量等分布マップ
- 2) International Atomic Energy Agency. 2006. Environmental consequences of the Chernobyl accident and their remediation: twenty years of experience. Chi.3.Wienna.
- 3) 栃木県. 2013. 牧草地除染マニュアル 第3版.  
<http://www.pref.tochigi.lg.jp/kinkyu/c08/documents/bokusoutijyosen.pdf>
- 4) 齋藤栄、齋藤憲夫、酒向奈都美、佐田竜一、上野源一. 2017. 畜産物等放射性セシウム低減技術の開発（平成 24 年度～平成 26 年度公共牧場実態調査）. 栃木県畜産酪農研究センター研究報告 第 4 号、36-38.
- 5) Smolders E, Van den Brande K, Merckx R. 1997. Concentrations of <sup>137</sup>Cs and K in soil solution predict the plant availability of <sup>137</sup>Cs in soils. Environm Sci Technol 31, 3432-2438.
- 6) 遠藤幸洋・松澤 保・吉田安宏・武藤健司. 2012. 牧草地における放射性セシウムの垂直分布と耕うんによる吸収抑制. 東北畜産学会報 62 (2) 、22.
- 7) 山田大吾. 2016. 傾斜放牧草地における省力化と省資源化を可能とする新たな施肥法 61(4)、248-251.
- 8) IAEA. 2010. Handbook of parameter values for the prediction of radionuclide transfer in terrestrial and freshwater environments. Technical Reports Series 472, 1-194.
- 9) 山下萌、江口紗綾、立石貴浩、築城幹典. 2016. イネ科牧草中放射性セシウム濃度の草種間差と経年変化. 日本草地学会誌 62(3)、134-139.
- 10) 齋藤憲夫、増山秀人、上野源一、齋藤栄、九石寛之、佐田竜一、酒向奈都美. 2017. 畜産物等放射性セシウム低減技術の開発（飼料作物の草種及び土壌条件の違いによる吸収移行調査）. 栃木県畜産酪農研究センター研究報告 第 4 号、31-35.

## Development of technics for reducing radioactive cesium in grass land. (Investigation of public pasture in 2015 to 2018)

### Summary

In permanent grassland after nuclear decontamination, some cases have been reported that radioactive cesium (RCs) concentrations of grasses exceed provisional tolerance in Tochigi prefecture. In this study, we aimed to develop a technic by applying potassium materials for reducing it less than 50Bq/kg, which is upper limit of feeding in the prefecture.

In 2015 to 2017, we screened required amounts of potassium chloride by applying it on the ground, it was found that 'K30kg/10a/year' was enough to reducing less than the limit. Considering diffusion to on-site, at same grassland in 2016 to 2018, we investigated method(s) using slow release fertilizers, only once application every year before pasturage. Results said that slow release fertilizers were unsuitable for practical use because RCs concentrations exceeded upper limit in some conditions, such as climates and season.

(131 語)