

委託研究「高レベル放射性廃棄物から分離した放射性CsおよびSrの熱利用設計に関する研究開発」

(研究開発テーマ：高レベル放射性廃棄物からの放射性同位元素の高度分離技術の開発)

研究成果報告概要

研究開発の概要

(研究実施期間) 令和2年度～令和3年度

(目的) 本研究では、青森県内での熱需要を考慮して、高レベル廃液から分離したCsやSrの崩壊熱をヒートポンプの熱源として有効に利用するシステムを提示することを目的とする。そこでは、核種の量および総発熱量を整理するとともに、核種からの発熱量と季節変動する熱需要量との違いを地中における蓄熱・回収により緩衝させて、給湯や融雪等の熱供給に活用するシステムを設計する。

(必要性) 高レベル放射性廃液に含まれるCs(セシウム)やSr(ストロンチウム)の発熱元素に着目し、その未利用エネルギーを活用することは、化石燃料の利用を低減する方向性に整合する。また、発熱元素を分離後、安定化するまでの期間、熱利用を進めることは、放射性廃棄物の低減にも寄与する。本研究では、青森県内の利用を考慮し、その具体的なシステムを提示することにより、化石燃料利用および放射性廃棄物の低減といった青森県におけるニーズに応える。

(新規性) CsやSrの発熱元素の熱を具体的にどのように利用するかは、熱利用を行うサイトでの熱需要にも依存し、十分な検討がなされていない。再処理と核種分離は継続的になされること、また、Cs-137やSr-90等は30年程度の半減期を持つことを考慮すると、発熱元素は年間ほぼ一定の熱供給が可能となる。他方、熱利用は季節毎の変動が大きい。これらの特徴と青森県の熱需要を考慮した熱供給システムの検討はこれまでなされていない。

(独創性) 本研究では熱利用システムの制約条件として、1) 分離したCsやSrの塩が熱により溶融しないこと、2) これら塩を封入した熱源管を貯蔵するプール水が沸騰しないこと、3) 季節での熱需要の変動に対応することを挙げ、本研究開発では、これらの条件を考慮し、地中への蓄熱により冬季の熱需要に対応する熱利用システムを提示する。このようなシステムはこれまで国内外においてなく、独創性がある。

(有用性) 高レベル廃液から分離したCsやSrを化学的に安定した塩として所定容器に充填し、それらを貯蔵プールに入れ、放射線を遮蔽してプールからの熱抽出をヒートポンプにより行う。その際、青森県の年間熱需要を考慮し、夏季の余剰分の熱を地中に蓄熱し、その熱を冬季の融雪に利用する。本システムは化石燃料利用および放射性廃棄物の双方を低減し、未利用エネルギーの活用にも大きく寄与する。

研究成果① 水を熱媒体とする熱利用システムの熱設計 (1/3)

はじめに高レベル廃液から分離される発熱元素の熱量の算定した。図1は使用済燃料1 MTUあたりのCsおよびSrの年間の発熱量¹⁾と、そこから求めた発熱量の減衰を示す近似曲線（ここでは縦軸を対数にとっているために直線になる）である。この近似曲線を用いて、年間800トン(MTU)の使用済燃料を再処理すると図2に示すように熱量は10年後に10MWになり、36MWで熱的には平衡に到達する。また、図2には使用済燃料からのCsおよびSrの累積蓄積量(Cs-, Sr-groupsの合計の含有量 4.63 kg/MTU)も併せて示している。

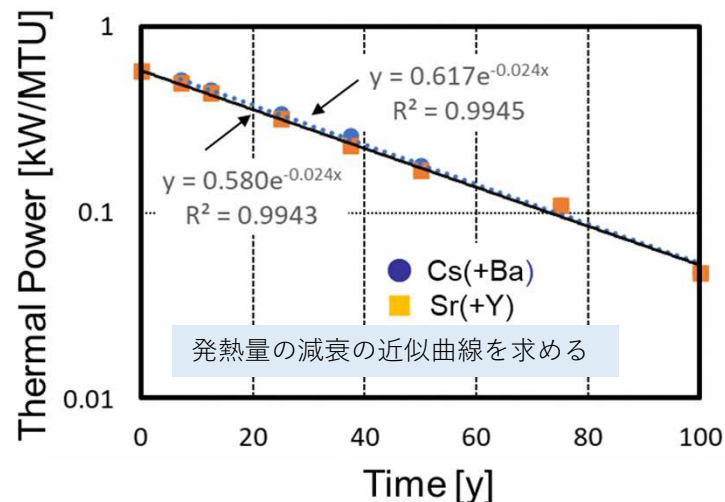


図1 CsおよびSrの崩壊による発熱量の減衰挙動
(熱利用は分離後5年を想定し、Cs-134(半減期2年)の発熱(0.48 kW/MTU)は考慮しない。その場合、Csの初期の発熱量は0.62 kW/MTUとなり、Srの初期の発熱量0.58 kW/MTUと同程度になる。図中にCs(+Ba)およびSr(+Y)と記載したのは娘核種(Cs-137の場合Ba-137mおよびBa-137, Sr-90の場合Y-90)による発熱量も含めていることを意味する。)

次に、前段である分離工程²⁾との関連を整理し、塩としてこれら発熱元素を利用することとした。ここで塩としては、Csについては塩化物 (CsCl: 密度4.0 g/cm³, 融点 645°C, 沸点 1295°C), Srについてはフッ化物 (SrF₂, 密度4.2 g/cm³, 融点 1190°C, 沸点 2460°C) であり、これら粉体を各々図3に示す二重円管に締め固めることなく充填する(次頁下の注1を参照)。

参考文献2) US DOE: HNF-7342 (2000).

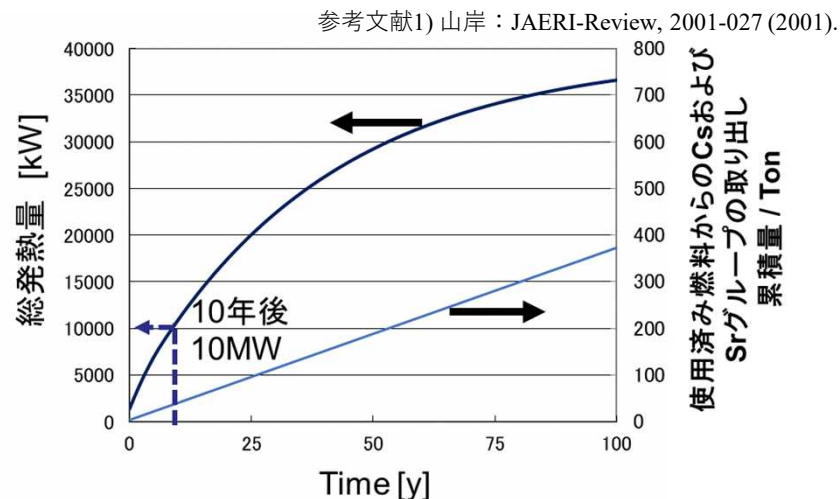


図2 CsとSrの発熱量の減衰(図1)を考慮して算出した総発熱量とCsとSrの累積蓄積量
(平衡となる発熱量は36 MWであるが、100年間に要することから、**本研究では10年後に到達する10 MWの熱利用システムを具体化**し、経過年によってそのシステムを拡張する。)



図3 熱源管の詳細図(内管径2.0 cm, 外径 3.0 cm, 長さ1.0 m)

研究成果① 水を熱媒体とする熱利用システムの熱設計 (2/3)

図4は熱源管^{注1}(図3)を熱源管を6m幅のフレームに設置した状態を示す。このフレームは熱源管を可動させることができ、熱利用時には100本の熱源管が2 cm間隔で設置され、最終的に処分する場合には、100本をフレームの片側に寄せ、コンパクトにできる。図4の右図のようにこのフレームを高さ方向に3段設置し、本研究ではこれを一つの熱源モジュールと呼称する。図5は熱源モジュールを6つ束ねた状態を示したもので、本研究ではこれを一つの熱源ユニットと呼ぶ。この熱源ユニットには熱源管が100本×3×6=1,800本設置される。

このような熱源ユニットは1年間における発熱量の減衰は小さく、熱利用の観点からほぼ一定の発熱量となる。他方、青森県では冬季での融雪などエネルギー需要は季節によって大きく変動する。

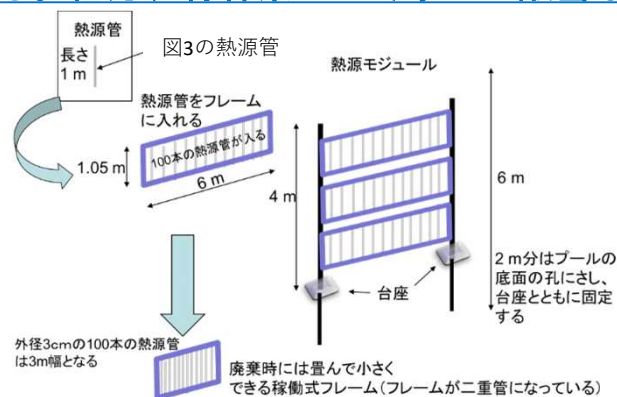


図4 熱源モジュールの概要

そこで本研究では、夏季の余剰熱を地中に蓄熱し、冬季に利用する地中蓄熱RI熱利用システムとした。

図6は夏季と冬季の場合の熱の流れを各々模式的に示している。プール水をヒートポンプとの間で循環させ、熱供給を行う。図中のCsおよびSrは図5の熱源ユニットをプール(水により放射線を遮蔽)を9つ設置したもので、表1から6つのプールが必要になる。

注1:熱解析により、熱源管内を締めめをすると、万が一プール水の水が消失した場合、熱源管の中心の温度が融点を越える場合がある。

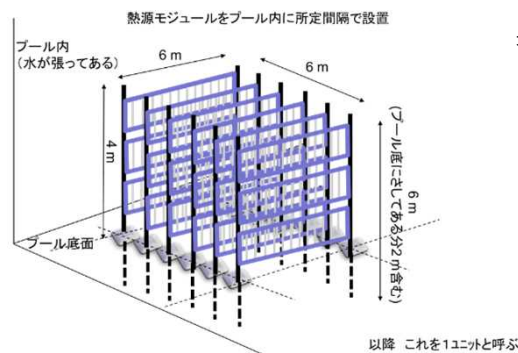


図5 熱源ユニットの概要

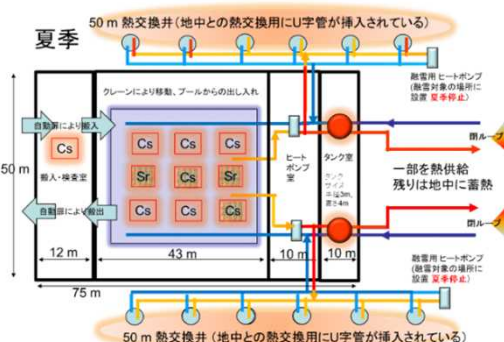
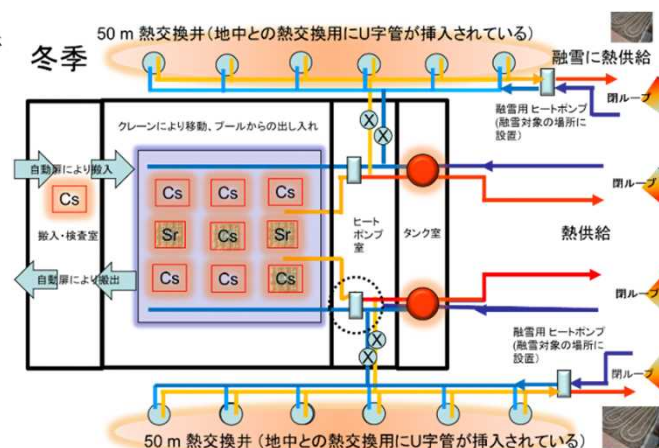


図6 地中蓄熱RI発熱システムの概念図(左図夏季、右図冬季、1つのプールあたり井戸50m×40本を利用(相互の熱干渉を防ぐための井戸間隔10 m)³⁾)

表1 年間に分離されるCsおよびSrの塩の状態における質量と体積と熱源管の本数

塩の形態	質量 ton/y	体積 m ³ /y	熱源管本数/y
CsCl	3.58	0.90	7,147
SrF ₂	1.25	0.30	2,354
合計	4.84	1.19	9,501

注) 四捨五入のために合計値が合わない場合がある



設計の考慮事項: RI発熱による蓄熱の総エネルギー、地下の上昇温度(平均で15℃以内に抑える)、井戸の最大熱交換量³⁾60 W/m、最大熱負荷(1月融雪時)での採熱量(青森県弘前市のデータ⁴⁾による)

研究成果① 水を熱媒体とする熱利用システムの熱設計 (3/3)

図7に、冬季の融雪の単位面積あたりの熱需要を青森県弘前市街地の融雪実績（実測値^{前出4)}を参考に、本研究で想定する融雪面積10万m²に必要な月毎の熱量を算出している。ここで棒グラフによって示される4月～11月の余剰熱量（＝RI発熱正味の熱供給量－隣接建屋等へのベース熱需要量、縦軸は左側）を地中に蓄熱し、それを12月～3月(冬季)において融雪に必要な熱量（図7中の冬季の正の棒グラフ、縦軸は右側）のために、余剰熱量の不足分（図7中の冬季の負の棒グラフ、縦軸は左側）を補う。ここでプールからの熱損失、熱配管およびHPによる熱損失を各々RI発熱量(10MW)の2割としている。このように設定することで、RI熱を有効に活用することができる。

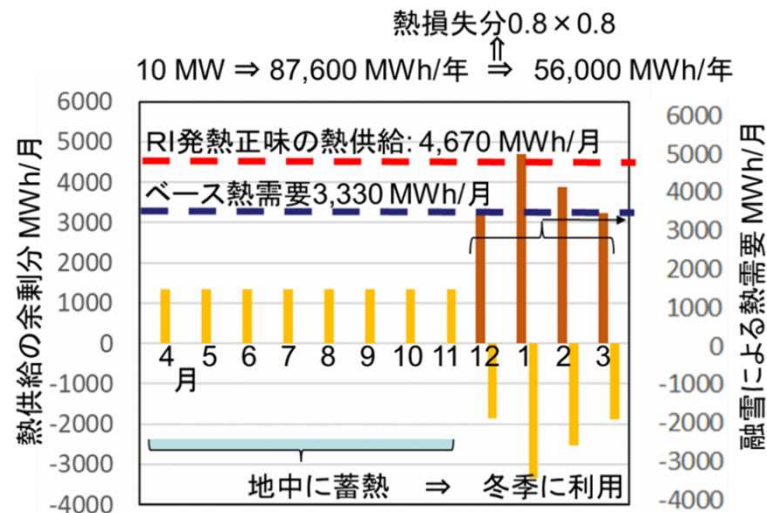


図7 月毎の熱供給の余剰分(RI正味の熱供給量－ベース熱需要量, 黄色の棒線) と融雪の熱需要量(茶色の棒線)

研究成果② 空気を熱媒体とする熱利用システムの熱設計

RI熱源プールの水を熱媒体とするほかに、プール水面直上の空気（水蒸気を含む）をヒートポンプの熱源として用いる方法がある。外気を熱源として用いるエアコンやエコキュートなども空気を熱媒体としている例となる。

この場合、プール直上の空気のエンタルピーが所定の値（本研究では温度40℃, 湿度85%に設定）に到達するためには、図8のような熱循環を考えると、単に外気をプール面に吹き付けるのでは不十分であり、図9のように水深1mの部分に多孔板を設置し、そこに空気を導入することにより、気泡を作り熱回収する必要があることが熱解析の結果から明らかになった。

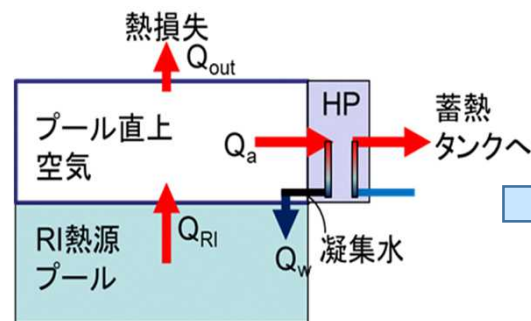
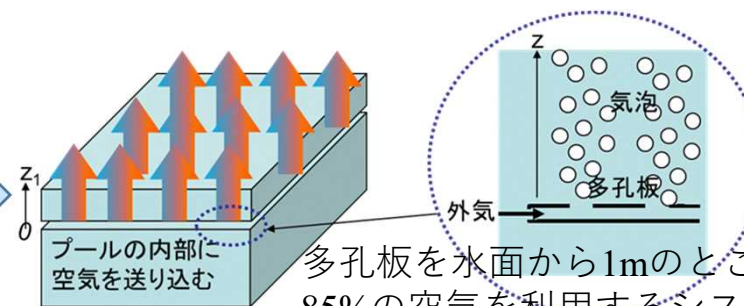


図8 空気熱媒体システムの概要



多孔板を水面から1mのところに置き、温度40℃、湿度85%の空気を利用するシステムの提示

図9 多孔板設置による空気による熱回収

研究成果③ 熱媒体として水を利用する場合と空気を利用する場合の比較・整理

表2に熱媒体として水を利用する場合と空気を利用する場合の比較・整理したものを示す。空気を利用する場合に必要なプール数は水面から 3mの範囲の加熱された空気をヒートポンプに利用する場合となる。どちらが選択するか、あるいはハイブリッドにするかの議論のベースとなる。

表2 熱媒体として水を用いた場合と空気を用いた場合の整理

	水を熱媒体とする場合	空気を熱媒体とする場合	備考
必要プール数	6	24	RI発熱量10 MW, プールサイズ36×36m×8 m深、空気の場合、利用空気層高さ3 mを想定
循環ポンプの負荷	大	小	
熱交換のメンテナンス時にプール水を一旦抜く必要性)	有 (但し、目詰まりの際は配管自体を入れ替えることにより回避することも可能)	無	循環配管の目詰まりの除去などを想定
電源喪失時	建屋天井を開放にして放熱	同左	
外気温の影響	小	大	水を媒体とする場合も熱損失に僅かに影響
外気湿度の影響	小	大	
通常時の放射線の遮蔽の問題	無	無	RI自体は何れの場合もプール内に設置 (熱源ユニットは1m以上の水の厚さがある)
プール水が万が一抜けた場合のRI塩の融解	無	無	空気による熱冷却により融点が最も低いCsClも融点以下の温度に設計済み
配管からのRI (僅かな濃度) の漏洩による建屋内HPの汚染の可能性	有 (除染には吸着フィルターが必要)	無	空気を熱媒体とする際にはプール水を直接HPに入れない
配管からのRI (僅かな濃度) の漏洩による建屋外HPの汚染の可能性	無	無	建屋内HPでの熱交換により、給湯タンクおよび井戸を汚染することは回避

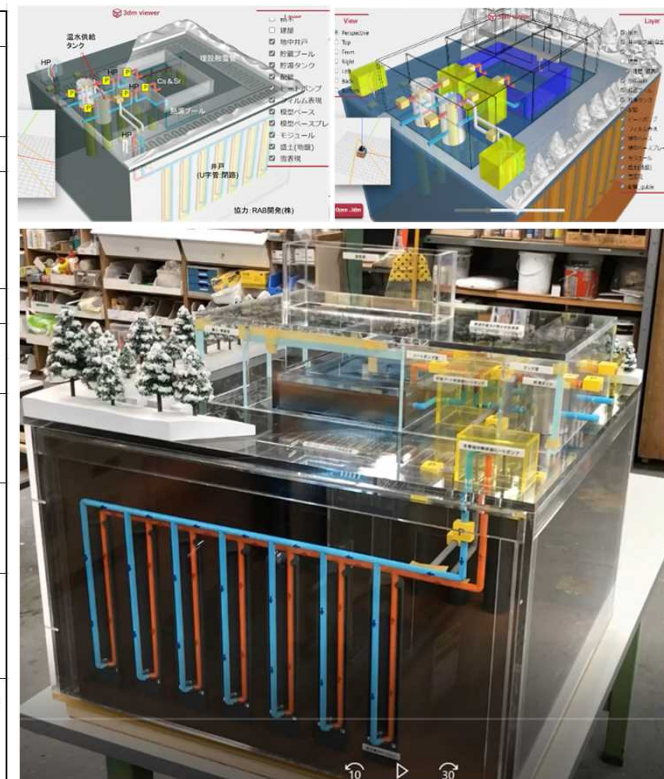


図10 地中蓄熱RI発熱利用システムの模型(水を熱媒体とする場合, 冬季)

研究成果④ 熱利用システムの概観模型の作成(W700×D650×H650mm)

図10に水を熱媒体とした場合の冬季での概念模型を示す。図の上が模型の鳥観図であり、左がプール内の部分、右が建屋部を黒の線で描いた図、そして下の写真が実際に作成した模型である。この模型は青森県量子科学センター玄関に展示している。建屋(天井高さ12 m, 排気塔高さ20 m、平面図のサイズは図6に記載)であり、排気塔は閉じているが、万が一の放熱に備えて設置している。

研究発表

令和4年1月13日、オンライン開催、日本原子力学会東北支部研究交流会、HLWから分離したCsおよびSrの発熱を利用した地中蓄熱ハイブリッド熱供給システム

研究会等の開催 なし

発表論文(講演要旨集)

HLWから分離したCsおよびSrの発熱を利用した地中蓄熱ハイブリッド熱供給システム、日本原子力学会東北支部研究交流会講演要旨集、p.24-25、令和4年1月13日、野上光博¹、新堀雄一¹、人見啓太郎¹、千田太詩¹、結城秀行²

(1. 東北大院工、2. 東北大サイクロトロン・ラジオアイソトープセンター)

青森県内への波及効果

図11の気温等にも表れるように**青森県では冬季に熱需要が大きい**。そこで、本研究では地中蓄熱を通じて当システムによる冬季における熱供給としてのポテンシャルを、下の囲みにあるように県内での省エネルギー量として数値化し、コスト試算と併せて(図12)提示した。このことは**青森県における化石燃料(石油や天然ガス)の利用削減、未利用エネルギーの探索に波及**する。また、水を熱媒体とする熱利用設計について模型(前頁参照)を作成し、青森県量子科学センター玄関に展示をした。

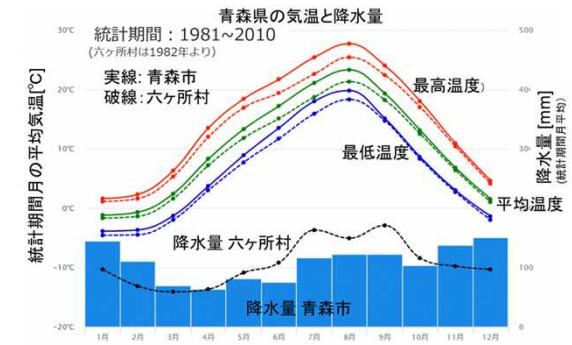


図11 青森県内の月毎の気温および降水量

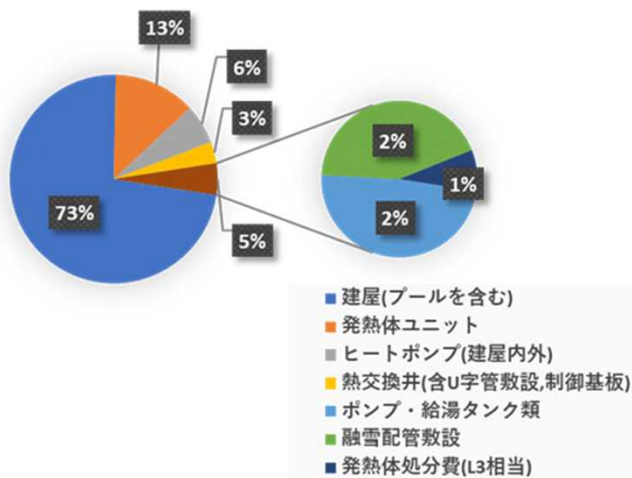


図12 本研究で提案するRI発熱利用システムのコスト割合(1プールあたり20億円)

このシステムを利用することは高レベル放射性廃棄物量の低減に加え、これまでのA重油(92円/L, 39.1 GJ/kL, 2.71 tCO₂/kL)などを利用して熱供給する分を節約する。そのコストは1つのプールに着目して試算すると10年の利用で8億円に相当する。一方、同様に1つのプールにおいて利用するヒートポンプに必要な電気料は16.32円/kWh (大口契約を想定)とすると10年で4億円となり、45年間このシステムを利用すると20億円の節約となる(燃料費からのみの建設費のペイバックタイム：45年)。さらに、二酸化炭素の削減量はA重油を節約する分からHPに投入する電気の発電に要する二酸化炭素の放出分(東北電力のCO₂排出原単位 0.548 kg-CO₂/kwh(2016)が10年後には1/2になることを考慮)を差し引くと、正味年間10,144 tonのCO₂の削減となる。

青森県の熱需要およびCsやSrの発熱元素の特徴を考慮したRI熱供給システム

未利用エネルギーの活用の事例の提示
正味年間10,144 tonのCO₂の削減