**「第二の核エネルギー時代の門を開く！」**

**溶融塩炉MSR(Molten Salt Reactor)が鍵となる**

**主催：一般社団法人共創日本ビジネスフオーラム**

**株式会社トリウムテックソリューション　　　　　　　　2020,12,08**

**「Terrestrial ENERGY（地球的エネルギー）輝くエネルギーの未来へと導く**

**「溶融塩炉の概観」**

# **David LeBlanc博士ビデオ翻訳**

**Ｓ１**

こんにちは. テレストリアル・エナジーの社長, CTO(最高技術責任者)のデビッド・ルブランです.

**溶融塩炉の概要について**お話します.

まず, このようにお話する機会を与えていただき感謝します.

最初に溶融塩炉技術の全体的な概要を説明して, 次に溶融塩炉の開発の歴史や

IMSR(統合型溶融塩炉)の技術的なことについて

それから燃料としてプルトニウムを利用する可能性について

そして会社の紹介やスケジュール的なことをお話したいと思います.

S2

では, **溶融塩炉の基礎について.**

これは液体燃料炉, つまり溶融塩で, 典型的な燃料としては

UF4, あるいはThF4やPuF3が含まれます.

これをキャリア塩に溶かします. 有名なものとしてFLiBeつまり2LiF-BeF2がありますが

これだけでなく他の候補についても調べています.

この燃料を含む溶融塩は臨界炉心と1次熱交換器の間を流れ,

2次側の「クリーン」な塩に熱を伝えます.

運転温度がとても高く700ºCあるので,

最先端の蒸気サイクルやガスブレイトンサイクルによく合い,

これらは50%かそれ以上の高い熱効率を得ることができます.

典型的には黒鉛減速で, 全てではなく高速中性子のものもありますが, 今私たちは熱中性子に注目しています.

これらの炉はトリウムからU-233を作る増殖炉として構成することもでき,

またはもっと単純化された燃焼炉, 現在の炉と同じように低濃縮ウランを使うものも構成できます.

S3

**次のスライドはフッ化物塩の一般的な長所について**です.

ウランとトリウムの広範囲の溶解度, 熱力学的にとても安定,

放射線分解しない, つまり炉内の高放射線場でも分解しません.

それに液体なのでいわゆる壊れるということはありません.

蒸気圧が非常に低く,

いわゆる酸化還元の制御をする, つまり液体のpHを適当な値に保てば

ステンレスやニッケルを多く含む合金の腐食は小さくなります

必要であれば化学プロセスとなじみが良く

空気や水と有害な反応がありません.

熱物性が非常に良く熱をよく伝えます. 原子力で使われる他の液体よりずっと良いです.

少なくとも運転開始時には透明で, 沸点が非常に高いです.

S4

それで, **溶融塩炉の長所**というのはこのような液体燃料の性質から来るわけです.

**安全に関しては**

液体であるため受動的な除熱能力が高いのです.

液体なので対流します. 自然対流して

熱を除去されるところまで運んでゆきます.

これが本当に基礎的ですばらしい長所です.

大きな負の温度反応度係数による固有の安定性があります.

もし何かの理由で炉の温度が上がれば出力は自動的に下がります.

この炉は低圧で運転され, 化学的な(事故につながる)駆動力もありません.

また, 2つの重要なFP(核分裂生成物), セシウムとヨウ素は固体燃料炉のシビアアクシデントでは非常に重要ですが,2つとも生成するとすぐ溶融塩の中で安定に保持されます.

これらの安全上の優位点により資本的費用を減らすことができます.

固有の安全性のため装置全体が簡素化できるわけです.

また, 低圧であり容器やパイプが薄いこと

非常に高い熱効率と優秀な冷却材でありポンプや熱交換器が小さくできること

そして, 複雑な燃料交換機構が不要なことなどのファクターが効いています.

長寿命廃棄物の問題について言えば, 既存の超ウラン元素を消費するための理想的なシステムです .

ほとんどがプルトニウムですが, 他のマイナー・アクチニドについても同様です.

溶融塩「燃焼炉」のデザインでさえも, 超ウラン元素はほとんど排出しません.

この点については後で, もう少しお話します.

資源の持続可能性と低い燃料サイクルコストについては

トリウム増殖炉は明白です. トリウム増殖炉があれば文字通り何百万年分のエネルギーが得られます. 多数の炉に対してでも.

しかし低濃縮ウランを使う燃焼炉であっても, 非常に効率的なウラン利用ができます.

私はこれについても強調したいと思います.

p5

**次のスライドは米国の歴史的経緯**です.

初めて考案されたのは1940年代の後期です.

1950年代には豊富な資金による航空機用原子炉計画で有力候補になりました.

ある意味で, 海軍が水冷却の軽水炉を誕生させ,

空軍が溶融塩炉を産み出したのです.

これがよいアイディアかどうかはともかく, つまり航空機での遮蔽は難しいわけですが

膨大な知識ベースができあがり

ARE(航空機試験炉)の試験が1954年に860ºCまでの高温で成功裏に行われました.

航空機炉に対するニーズは低下して計画は中断され

1960から70年代には発電炉の設計へと移って行きました.

ほとんどの仕事は米国のオークリッジ国立研究所(ORNL)で成されました.

米国の他の所でもいくつかの研究があり

そして世界では多くの研究が中国, 日本, 欧州などで成され, ロシアにもたくさんあります.

ところで, 当時世界は増殖炉が必要だと考えていました.

世界にあるウランはごく少量しかないという考えがその理由です.

それで, これはある意味でナトリウム高速増殖炉と溶融塩熱中性子増殖炉の競合になりました.

この流れが熱出力8MWの溶融塩炉試験(MSRE)の大きな成功につながりました.

1960年代の後期のことです.

いくつかのマイナーな課題も明らかになり, 研究されました.

ところが, 様々な理由によって, まあ政治的な理由と言いますか, 政治の斧が振り下ろされて

計画は70年代中盤に取消されてしまいました.

70年代の後期に少しですが, 低濃縮ウランを使用する燃焼炉の概念に関する最初の研究が成されました.

これは「変性(Denatured)」溶融塩炉, DMSRと呼ばれるものです.

p6

次のスライドは, 航空機炉計画について少しだけ.

この計画の目標は化石燃料の代替としてジェットエンジンに入ってくる空気を加熱することでした.

そすると航空機は1ヶ月でも連続して飛行を続け任務を行うことができます.

コンセプト全体としては賢いものではなかったかもしれませんが, 多くの開拓的な研究が成されました.

それが1960年代の発電炉の研究に引き継がれ

溶融塩炉試験(MSRE)の炉製作と実験成功につながりました.

それはFLiBeをキャリア塩として使い

最初にU-233を燃料として使いました.

このU-233は別の炉で生成されてこの炉に持ち込まれたものです.

ウランとプルトニウムの混合燃料塩の使用も初めてです.

それで全体として非常に成功した運転で, メインテナンスもスムーズで, とても良い原子炉でした.

p7

次のスライドは, もう少し詳細に入ります.

溶融塩炉は本当に単純で

炉容器があって, その中に黒鉛減速材があり

燃料の溶融塩が黒鉛の中を流れます.

p8

右側が原子炉容器で, 左が黒鉛を組み立てている様子が左です.

p9

次のスライドは, 溶融塩炉試験(MSRE)の試験セルの内側の様子です.

炉容器がどこにあるか, 熱交換器と水冷された燃料塩ポンプを示しています.

前述のようにこの炉は5年間にわたり非常に良好に運転されました.

p10

次のスライドは, 私はこの写真が大好きなんですが, グレン・シーボーグ氏です.

草創期の偉大でパイオニア的な原子力工学かつ核化学の専門家であり

特に彼はU-233の発見者です.

この写真で彼は, 溶融塩炉試験(MSRE)で1968年にU-233利用に切り替えた時の炉を始動しています.

さて, グレンの前に乗り出しているのがJ.R.ディック・エンゲルです.

スライドには主任技術者J.R.エンゲルが必要があればグレンを補佐するように構えているとあります.

テレストリアル・エナジーの草創期には

私たちはアドバイザーだったディック・エンゲルといっしょに多くのことをしました. 定期的なミーテイングもしていました.

溶融塩炉の全てに関する膨大な量の知識と記憶

不幸にして彼は何年か前, 2017年に逝去しましたが

有名なエピソードとして, 彼はグレン・シーボーグの上に乗り出していたのは

一般人のグレンが原子炉を始動しようとしていたから

それでディックは, もしもグレンが何か変なことをしたらすぐに介入できるように構えていたというのです. 制御棒などで, ということです.

私たちは本当にディックがなつかしいです. 彼は宝であり, 共に働けたことを本当に感謝しています.

p11

次のスライドですが, ORNLでの研究は

溶融塩増殖炉(MSBR)へと向かいます.

これは黒鉛減速材を用い, 単一流体と呼ばれ, 増殖を目的としていました.

この図はGen-VI国際フォーラムから引用したものですが

そこでは賢明にも溶融塩炉が6つ将来型炉の中の1つとして, 将来に向かって研究すべきものとして選択されました.

このGen-IVのWebサイトから持ってきた図はだいたいMSBRを表しています.

2002年ごろによく知られるようになったヘリウムブレイトンサイクルに変更されていますが

これはいわゆる教科書的な設計とでも言うべきものです.

次のスライドで, この設計からスタートすると, いろいろ重要な課題があるというお話をします. つまり, オークリッジ(ORNL)のMSBRです.

p12

それは, オンラインFP(核分裂生成物)除去を必要とします.

増殖炉にしようとすれば, FPを取り除かなければなりません. 増殖のサイクルを回すために必要なのです.

液体がずっとシンプルだとしても, 非常に多量の燃料塩の処理を必要とします.

キャリア塩としてのFLiBeは, リチウムとベリリウムから相当な量のトリチウム, つまり放射性のガスを生成します.

この制御は難しいです. トリチウムは熱い金属壁を透過してしまうので.

反応度温度係数は, この設計の場合はごく弱い負の値になります. 前に述べたような強い負の反応度ではありません.

それで, これらがこの設計における重要な課題でした.

また, トリウム-ウラン233サイクルは, 原理的に高濃縮ウランの使用を意味します.

これは, 政治的, 国際的などなどの観点から大きな問題です.

この形式の炉を, 25年, 30年, 今日求められるかもしれない60年というような, 長期間運転しようとすると, 溶融塩に接触する材料の腐食が, 主な課題となるでしょう.

それから, 黒鉛には大きな利点がある反面, 出力密度に依存する寿命があることが知られています.

この場合には4年という寿命があり, 黒鉛の交換を計画しなければなりません.

これらの問題は, 次の「なぜ増殖炉?」というスライドに示すような事実に行き着きます.

p13

これらの問題は, そもそも増殖炉を作ろうとするところに由来しているのです.

私が指摘したいのは, ウランは十分な量があるということです.

1950−60年代にはそうは思っていませんでした.

いわゆる「資源」, 世界で入手可能と言われるものを見てみると

それは, 高価な掘削で確認されたものだけに限られます.

もっとウランが必要なら, もっと探して, 「資源」は増えるわけです.

ウラン価格が高くなれば, より低級の鉱石も資源となります.

なので, 増殖炉ではない燃焼炉の大きな利用拡大があっても大丈夫です.

いつかは増殖炉へと移行することが必要でしょうが, 当分大丈夫ということです.

MSR燃焼炉のアプローチで低濃縮ウランによる運転をすれば, 先ほど述べたように多くの課題が解決できます.

ORNLによる最後の重要な成果は変性(Denatured)溶融塩炉(DMSR)で, 低濃縮ウランで運転するように提案された溶融塩炉でした.

p14

次のスライドは, MSR燃焼炉アプローチによる課題解決です.

FP(核分裂生成物)の除去については, 燃料溶融塩の「処理」が何も要りません.

ただ酸化還元を制御するための化学制御だけすれば良いのです.

塩はバッチとして使用し, 定期的に燃料の補充をすれば良いわけです.

トリチウム制御も重要ですが

これは燃焼炉なので, 中性子特性に優れた同位体濃縮されたLi-7やBeは不要です.

キャリア塩の成分の候補としてはNaF, RbF, ZrF4, KFなどがありますが

これらの材料はほとんどトリチウムを生成しません. これが燃焼炉アプローチの大きな利点です.

反応度係数については詳しくはお話しませんが

燃焼炉アプローチは優れた反応度係数を示しています.

ごく簡単に言うと, 黒鉛温度に対して負の反応度を持ち, これが望ましい特性です. これに対して増殖炉では正になります.

核拡散防止については, 常に低濃縮ウラン(LEU,denatured)を使います.

炉内で生成するプルトニウムは240や242の同位体濃度がすぐに高くなり

プルトニウム同位体は実際に他のFP等から分離できません. たとえ後にリサイクルしたとしてもです.

p15

次のスライド, 残る課題は材料に関連するものです.

60年間使える原子炉を作ろうとすると

長期の腐食と放射線損傷が問題となります.

化学的な制御をすれば, 高ニッケル鋼, ステンレス316と304は良く性能を発揮します.

しかし30年以上の寿命を実証しようとするのは簡単ではありません.

さて, 黒鉛は多くの利点をもっています. 黒鉛と溶融塩の間に被覆は不要です.

非常に低濃縮度の燃料で炉を始動できます. 2%のU-235は普通です.

核分裂性物質が非常に低濃度であることにより, 炉心外での臨界は事実上不可能です.

この低い核分裂性物質濃度を可能にするのが優れた減速材である黒鉛です.

また, 黒鉛は容器壁を高い中性子束から保護します.

しかし, 黒鉛は寿命が限られています.

p16

次のスライド, テレストリアル・エナジーの統合型溶融塩炉(IMSR)とは何かですが

これが, これらの残る課題を解決するものです.

さて, これはMSR燃焼炉デザインで, 2%くらいの低濃縮ウラン(LEU)で始動し, 補充燃料は標準濃縮度の5%LEU(低濃縮ウラン)です.

これは重要な点で, 他のほとんどの将来型炉はより高い濃縮度のLEUを必要とします.

高いものでは99.9%の濃縮度を必要とし, 商業的には入手不可能です.

私たちはそんなものは要りません. 5%の標準的なもので大丈夫です.

1次系の統合, つまり黒鉛と炉容器と1次熱交換器を全て密閉された炉容器に格納しています.

この炉容器を, 7年の寿命の後に交換します.

つまり, 出力密度を, 黒鉛の寿命が7-10年になるように決めるということです.

そして黒鉛を交換する代わりに, 炉心ユニット(炉容器)をまるごと交換するわけです.

これはつまり, 溶融塩燃料に接触する金属が7年という寿命に耐えることを実証すれば良いということにもなります.

これにより, 熱出力440MWと計画されており, 電気出力は約200MWになります.

サイズは輸送のしやすさを考慮して幅3.7mです.

別の塩材料によりトリチウム生成を低く押さえることや, 新たな受動的なガス除去の方法を模索しています.

受動的な崩壊熱除去を「その場」で, 燃料塩をダンプタンクへ落とすことなしで行います.

詳細は時間がないので省略しますが, 多くの溶融塩炉では, いわゆるフリーズバルブを使って燃料塩をダンプタンクへ落とすことが提案されています.

私たちはむしろ, 炉容器の下部に貫通部を持たない方が良いと考え, その場で冷却する方法をとります.

最先端の安全性は, 実はコスト・イノベーションをもたらします.

p17

次のスライドは, IMSR発電プラントがのしくみです.

これは概略図ですが

IMSRの炉心ユニットでは, 赤い矢印で溶融塩燃料の流れを示しています.

黒鉛の炉心エレメントの中を上へ流れ, ここで熱が発生して溶融塩燃料の温度が上がります.

上向きの流れはチムニーの所で止まり, ポンプによって下へ流れ1次熱交換器を通過し

壁に沿って下へ流れて循環します.

2次系のクリーンな塩が熱を運び出します.

これもフッ化物塩ですが放射性ではありません. 一時的に放射化はしますが.

公衆との間にもうひとつのバリアを設けます.

これもORNLで提案された方法ですが, 3次系で硝酸塩ベースのソーラーソルトと言われるものを使います.

とても安価な塩で, これがもうひとつのバリアになります.

つまり, 私たちの炉は600ºCかそれに近い温度のソーラーソルトを熱源として提供するわけです.

ほぼ確実ですが, 最初の用途は発電でしょう.

つまり蒸気を作り, 蒸気ランキンサイクルに使いますが

この塩は非常に安価な蓄熱媒体として, 電力網の安定化のためのにも使えるでしょう.

つまり, 昼夜の電力変動の調整などに利用するわけです.

さらに, 600ºCの熱源は, ほとんどの水炉の300ºCのアウトプットと比べると

産業プロセスへの熱利用においてとてつもない可能性を持っています.

つまり, 化学合成や水の淡水化, 一般的な石油化学工業などへの利用です.

p18

次のスライドでは, IMSRのキーとなるイノベーションについて確認しておきます.

これは, 交換可能な炉心ユニットということです.

これも簡単な概念図ですが

2次キャリア塩の入口, 出口などを示しています.

ポイントは, キーとなるイノベーションは, 1次系のコンポーネントを統合して

密閉された, 交換可能でコンパクトな炉心ユニットにしたことです.

このプラントは7年間の運転ができます.

統合型設計に, 商業的価値の全てが詰まっています.

その固有安全性, 運転の容易さ, 資本回収率の高さという価値です.

p19

次のスライドに移ります.

簡単に言うと, 私たちはこの炉をスイッチト・ローディング・アレンジメントと呼ばれる方法で運用します.

7年経ってひとつの炉心の運転を終えると

燃料溶融塩はすぐ近くの使用済み燃料貯蔵タンクにドレインされます.

空の炉心ユニットは移動することもできますが, 次の7年間そのまま置いておいて放射線が低減するのを待つ方が良いと思います.

それで1つのプラントに2つの運転サイロ(AとB)があるわけです.

7年の運転の後, 新しいクリーンな炉心ユニットが運転サイロBにインストールされ

これが7年間運転されます.

それで7年間の冷却の後, サイロAの使用済みユニットは原子炉建屋内の長期貯蔵庫に移動されます.

ここで非常に重要なのは, 全ての使用済み燃料と使用済み炉心ユニットが原子炉建屋の中に貯蔵されているということです.

放射性廃棄物は, いちばん最後の廃炉の時まで施設から出る必要がないのです.

p20

次のスライドで示しているのは

発電や産業用熱源など様々な利用の可能性をもっているということです.

前にも述べたように,蓄熱を使って変動型の再生エネルギーを補完するとか,いろいろな産業熱プロセスなど

したがって, 単に電力供給だけではないのです.

産業界の熱需要には巨大なマーケットの可能性があります.

p21

次のスライドは, IMSRにより実現できる変形自在のパワープラント経済についてハイライトしたものです.

溶融塩を使う意味は, 熱力学的にとても安定, 高温, 大気圧で運転

非常に大きな熱容量, 化学結合によるFP(核分裂生成物)の保持

大きな負の温度反応度

これらによってもたらされる, 低いCAPEX(資本的経費)なのです.

高圧の系統がなく

冷却のための能動的な工学的安全計を排除しました. 受動的冷却系にできるからです.

これによってプラントを大幅に簡素化でき

また, 小さなプラントで, モジュール化でき, 建設期間が短く

一般的に言って資金調達しやすいということになります.

これら全てが, 高い収益をもたらします.

熱効率はほとんどのGen-III水冷却炉に比べて50%も高く

また, 必要人員や保守の工数も削減できると思います.

そういうわけで, 私たちは本当にこれがパワープラント経済のゲームチェンジャーになるポテンシャルをもつと感じています.

p22

次のスライドでは, 比較を示してみます.

コスト・エンジニアリングによる評価で「n-th of kind」(量産効果を考慮した)発電コストは50USドル/MWhくらいになります.

これは内部と独立を併せたコスト・エンジニアリングによるもので

具体的にはAECLの首席コスト・エンジニアに依頼しました.

AECLはCANDU炉を造っていて

彼はまた首席コスト・エンジニアとしてPBMR, ペブルベッド・モジュラー炉にも関わりました. これは一部南アフリカで開発されたものです.

このコスト評価はクラス3のもので, 私たち自身で経済性をコンバインド天然ガスと競合できることを示したものです.

p23

次のスライドでは, 放射性廃棄物について一般的なお話をします.

IMSRの使用済み燃料は, もっとよい未来への良い出発と言いたいと思います.

この炉は単純なワンス・スルー方式の炉として建設しようとしていますが

将来的な可能性については多くの意欲をもっています.

ワンス・スルーであっても, 電力1kWh当たりのプルトニウム生成は従来の軽水炉よりずっと少量になります.

また, FP(核分裂生成物)の廃棄物量も少ないです.

いくつかのファクターがより効率的であるため

同じ量の電気を作るために必要な燃料がより少なくて済むわけです.

また, プルトニウムは熱中性子との反応断面積が非常に大きいため炉内でずっとよく燃焼します.

それから, IMSRは燃料サイクルを「閉じる」能力をもつことを述べたいと思います.

これはそれ自体が作る超ウラン元素を再利用して転換することによって可能になります.

使用済みの溶融塩燃料が出てきたら

多くの超ウラン元素, つまりPu, Np, Am, Cmなどを溶融アルミニウムと接触させて除去することができます.

これらのアクチニドはアルミニウムに移行し, フッ化アルミニウムが少し溶融塩に移行するので

これらのPu, Np, Am, Cmなどを抽出して補充燃料に入れて炉に戻すわけです.

このようにして, IMSRは超ウラン元素を排出することなく燃料サイクルを「閉じる」ことができるのです.

さて, このようにすれば, 少量のウランが廃棄物に入りますが, このウランは低濃縮で

含まれるU-235はごく少量なので, 天然のウラン鉱石と比べても放射性ではありません.

p24

次のスライドはIMSRの非常に熱的(低エネルギー)な「柔らかい」は中性子スペクトルを示します.

これによって, 反応度係数の長所が得られるわけです.

また, このスライドではMSRE(溶融塩炉実験)の中性子スペクトルとの比較を示しています. こちらも非常に熱的です.

「非常に熱的なスペクトル」が何を意味するかと言うと

プルトニウム, PuF3の生成を抑制できるのです.

プルトニウムが炉内で生成するのと同じくらい速く消費されるので, 溶融塩の中のプルトニウムの量は, 常に非常に非常に低く保たれます.

p25

次のスライドで, Puとマイナー・アクチニドの利用についてのTEIの努力についてもう少しお話します.

別の方法でPuとマイナー・アクチニドを分離する方法と比べて一番の利点は, 液体燃料ということです.

固体燃料の製造が必要ありません.

もうひとつの利点が高フラックスの熱中性子の利用から来るものです.

プルトニウムが高い速度で転換され, 数年で消費されます.

高速中性子の場合には, 溶融塩炉でプルトニウムが完全に消費されるのに数十年かかるところです.

高速中性子を使うナトリウム炉では, マイナー・アクチニドを利用しようとするといろいろ複雑なことがあります。

そういう複雑さは熱中性子スペクトルを使う溶融塩炉にはありません.

また, 熱中性子スペクトルは非常に大きな転換断面積を持ち

いくつかの長寿命のFP(核分裂生成物)も安定元素に転換されるようです.

それで, 設計上...

低濃縮ウランでワンス・スルーの燃料サイクルという設計をしたわけですが

設計上, 内部的に公開論文で示したように, あるいはこれも論文発表しますが

かなりの割合のプルトニウムを補充燃料として, 低濃縮ウランが存在するかぎり, 供給することができます.

したがって, 私たちの炉で生成するプルトニウムを消費することができ

さらに, もっと多くのプルトニウムを消費したければ, そのように炉心を最適化することもできます.

この件が, 日本の共同研究者の皆さんとの共同研究につながりました.

トリウムテック・ソリューションズ(TTS)とMOU(覚書)を取り交わし, IMSRや日本の故古川博士によるFUJIのような, 黒鉛減速溶融塩炉におけるプルトニウム消費に関する協力をしています.

主な共同研究者は吉岡博士と木下博士です.

TTSはこの共同研究を推進するため経産省NEXIPに採択されました.

その予算の一部で, 私は2020年1月に東京に行き, 経産省とJAPCOで講演しました. 今回もその続きということです.

p26

次のスライドでは, IMSRのプラグマティックなイノベーションについてまとめます.

私たちは革新的でありたいと思いますが, できるだけシンプルでもありたいと考えます.

炉心ユニットを7年毎に交換する方式により, 黒鉛減速の利点を活かすことができ, 炉容器と熱交換器(HX)の金属の要件を単純化できます.

7年の寿命で良いわけですから.

安価なキャリア塩でトリチウム生成を防止するものを使います.

受動的な崩壊熱除去ができます.

強い負の温度反応度をもつ設計により固有の負荷追従性を持ち

制御棒が不要で, 受動的なシャットダウンも可能です.

システムの一部としてシャットダウン用の制御棒がありますが, 安全のために必要というわけではありません.

密閉されたポンプ系統によりオフガス管理が大幅に簡素化されています.

オフガスとしてゼノンとクリプトンがありますが, これらは炉心ユニットからとてもゆっくり出てきます.

詳細は省略しますが.

黒鉛の使用と熱中性子スペクトルにより, 起動時の濃縮度は非常に低くてよく, 補充も標準的な濃縮度です.

プルトニウム廃棄物生成を大幅削減しつつ, 塩の処理は不要です.

今のままでも良好な燃料経済ですが, 将来的にさらに改良を計画しています.

トリチウムの処理が解決されれば, つまり濃縮リチウム(Li-7)が使えるようになった時にはそれを使うようになるでしょう.

そうなれば, ウラン資源の利用効率は大きく進歩するでしょう.

p27

これが最後の技術的なスライドですが, 技術は準備できているという話です.

私たちは, 過去に使われたものを最大限に利用しようとしています.

フッ化物化学, 標準的な低濃縮度ウラン(LEU), 黒鉛減速による熱中性子

私たちが感じているのは, 基本的な技術的問題はないということです.

私たちにはたくさんの仕事があります.

大量に詳細な技術開発をして基礎設計を完遂しなければなりませんが

実際, 基本的な問題はありません.

溶融塩炉試験(MSRE)はある意味で私たちの技術を実証しています. ほぼ同じものだからです.

MSREを私たちの技術の祖父とすれば, 父はDSMR, 1970年代に研究された変性(Denatured)MSRです.

他にもいくつかORNLの最近の概念を参考にしています.

それは固体燃料炉に関するものですが, これも統合的な炉心構成です.

p28

次のスライドでは, 私と日本とのつながりについて少しお話します.

私の「溶融塩の旅」みたいなものは博士課程の研究をしている時に始まりました.

1996年に核融合に関心をもつようになり, 全ての道が溶融塩炉につながるようになりました.

当時, 古川教授とちょっとした文通が始まりました. 1996年のことです.

当時は, 現代の若い人があまり知らない技術で通信していました.

手紙と郵便による通信です.(笑)

最初の頃の短いやり取りの後, えー..

古川教授は当時, 溶融塩技術の世界的な第一人者の一人で

2011年に不幸にして逝去されるまでずっとそうでした.

私は溶融塩炉の改良と設計について研究を続け

そのうち世界が, 溶融塩炉のすばらしい可能性を認め始めました.

2002年にGen-IV国際フォーラムで6つの将来炉技術の1つとして採択されたことで脚光を浴びたのはご存知のとおりです.

ついに古川教授にお会いすることができたのは2010年でした.

その時に, 日本の溶融塩の専門家の方々にも何人かお会いして実りある協力を始めました.

それが吉岡博士, 木下博士, 島津教授です.

IMSRの設計は, 多くの特徴を古川教授によるFUJIの設計と共有しています.

p29

次のスライド, この会議で古川教授と初めてお会いしたのですが

「トリウムエネルギー会議2010」です. 私も講演をしました.

当時, 古川教授はトリウムテックソリューションズ(TTS)を創設された直後でした.

その古川教授との面会によってとても刺激を受け

それで私は2013年に私たちの会社を創設するインスピレーションを得ました.

だから1996年以来, 実に24年間の日本と友好関係をもっていて

2010年からはずっとずっと強い関係になっているわけです.

p30

次のスライドで私たちの会社を紹介したいと思います.

長々とは話しませんが, これが私たちの役員・取締役です.

サイモン・アイリッシュ(Simon Irish)氏はCEOですばらしい仕事をしており, 私たちの船を導き, 資金を調達し...といろいろな働きをしています.

独立役員として

デビッド・ヒル(David Hill)氏は

前...えー...

役員のポジションを米国の多くの主な研究機関...

アルゴンヌ, オークリッジ, アイダホ国立研で歴任されました.

それから, フレッド・バックマン(Fred Backman)氏とジム・ラインチ(Jim Reinsch)氏は

原子力エネルギーの分野では非常によく知られた方々です.

長くなるのでこれくらいにしておきますが.

それからヒュー・マクディアミッド(Hugh MacDiarmid)氏.

彼はAECL(カナダ原子力公社)の前社長・CEOでした.

AECLは政府公社で, CANDU炉を設計したところです.

p31

次のスライドに移りまして

私たちはさらに, 広範囲の協力を得る法人産業諮問委員会を組織しました.

私たちはこれらの会社に常に最新情報を伝え

彼らから多くのフィードバックを得ています.

彼らは, 実際に私たちが白紙の状態から始めたのを見ましたし

非常に熱心に, 私たちがどこへ向かっているかに注目しています.

もちろん彼らは, 私たちの将来の顧客を代表する人々でもあります.

ほとんどの北米の有力な原子力事業者, ENGiEは欧州です.

p32

統合型溶融塩炉(IMSR)は主にカナダで開発していますが

開発計画は米国でも進行させています.

これを率いているのが系列会社であるテレストリアル・エナジーUSA(TEUSA)です.

TEUSAは米国で所有・管理している会社で, 本社はコネチカット州にあります.

彼らの目標は米国におけるIMSRの商業化です.

それで米国NRCなどと多くのやり取りをしています.

したがって, 原点となる技術開発は主にテレストリアル・エナジーInc(TEI), カナダ側で行っており

これを米国市場に売り込もうとしているわけです.

それでTEUSA(米国)はTEI(カナダ)と協力して

米国NRCの要求に対応するための設計の差異を最小限にしようとしています.

カナダの原子力における要求と, 少しだけ違いがあるかもしれませんから.

TEUSAは米国でIMSR開発を推進するプロジェクトのパートナーシップを構築していて

GAINバウチャーを2件受けてIMSR燃料溶融塩の物性研究をしており

また, DOE資金による規制支援補助金プロジェクトが進行中です.

p33

最後のいくつかのスライドは原子力イノベーション政策の時系列です.

あまり詳細には入りませんが, 世界, 特に政治の世界が将来型原子力に門戸を開いています.

世界中でたくさんの計画があります.

米国, カナダ, 英国, いちばん最近では日本のNEXIP計画があります.

いちばん最近では, 米国の将来型炉実証計画のことを話すように言われたのですが

つい最近, 2つの炉に各々8千万USドルを出資するというアナウンスがありました.

目標として彼らの資金を提供する可能性を示しています.

私たちの視点では驚くことではありませんが, これに選ばれた炉は

ひとつはナトリウム高速炉で

もうひとつはTRISO燃料のヘリウム冷却炉です.

というのは, これら2つは米国DOEの計画の中心にこの数十年あり続けたからです.

もうひとつ申し上げておきましょう.

彼らは過去に経験があり, そして少なくとも

その過去の経験では, コスト, 経済などで成功とは言えませんでした.

それで, ちょっと..明白なのは, 政府の支援が助けになるということでしょう.

しかし私たちが本当に思うのは, ニューウェイブの将来型原子力は

本当に民間セクターで推進する必要があるということです.

そして, 民間セクターは真実のコスト・イノベーションを必要としています.

私たち本当に感じますが, 溶融塩技術について

私たちにはしなければならないことが多くありますが

それによって本当にコスト・イノベーションのことを実証することができ

そして, 民間資本が, やりたい意志を示していることを推進するならば

各国政府は支援できます. しかし, いわゆる政府が全部をやる必要はないわけです.

最後の数枚のスライドは最近の弊社のマイルストーンです.

p34

全部はお話する時間がありませんが

私たちはカナダの認可前申請手続き, ベンダー・デザイン・レビュー(VDR)というものを行っています.

私たちがVDRの第1フェーズを開始し, 終了した初めての原子炉メーカーになりました.

そして, 将来型炉として初めてVDR第2フェーズに入った原子炉メーカーです.

だいたい半分くらいまで進んでいます.

この中で主なハイライトに絞ってお話します.

2019年8月にUSNRC(米国原子力規制委員会)とCNSC(カナダ原子力安全委員会)が

将来型炉設計の共同レビューに関する協力の覚書を発表しました.

その10月にIMSRがUSNRCとCNSCの最初の将来型炉の共同レビューに選ばれました.

彼らはまたGen-IIIの水冷却炉の技術も審査しています.

えー, いちばん最近の非常に重要なお知らせとしては

2020年10月, オンタリオ・パワー・ジェネレーション(OPG)により精査の結果, IMSRが3つの技術のひとつとして選抜されました.

OPGはほとんどのCANDU炉を運転している会社で

CANDU炉は最大の州であるオンタリオ州の主要電源です.

だからこれは非常に重要なステップで私たちはこの件で忙しい状況です.

また同じ10月に, カナダ政府がTEIに将来型炉規制手続きのために2千万カナダドルを出資することを発表しました.

これは戦略的イノベーション・ファンド(SIF)を通じた出資です.

p35

最後のスライドは大まかな配備計画の時系列を示したものです.

あまり詳しくは話しませんが, 最後にひとこと.

私たちはだいたいVDR(ベンダー・デザイン・レビュー)の第2フェーズの半ば過ぎにいます.

これが2021年内の最初の販売への端緒になると感じています.

また, これは当然, 敷地の造成と認可に関する規制手続きに向けた一歩でもあります.

これは早ければ2022年の早い時期に始まります.

そして建設許可, 着工が2024年です.

私たちの感じでは原子炉を引き渡せるのは, 十分な試運転サイクルを経た後

2028年末になります.

その後は...感じとして, この期間には米国の炉も歩調を合わせて進むでしょうし, たぶんそれまでにはどこか他の所もあるかも知れません.

一度これが実証されれば, 私たちは世界的な市場への明確な道に乗ることができると思います.

とてもエキサイティングな話です.

本日は時間をとっていただきありがとうございました. この場でお話でき大変光栄です.

これでプレゼンテーションを終わります.