



- 高速増殖炉サイクルの研究開発 - 高速増殖炉サイクル実用化戦略調査研究

1. はじめに

高速増殖炉（FBR）サイクル実用化戦略調査研究は、安全性を大前提として、軽水炉サイクル及びその他の基幹電源と比肩する経済性を達成し得るよう、FBRサイクルが本来有する長所を最大限に活用した実用化像を提案し、併せて将来の社会の多様なニーズに柔軟に対応できる開発戦略を提示することにより、FBRサイクルを将来の主要なエネルギー供給源として確立する技術体系を整備することを目的とする。

本研究は、フェーズⅠ（1999年度、2000年度）及びフェーズⅡ（2001年度から5年間）と、段階に分けて実施することとし、1999年7月から、サイクル機構、電気事業者、(財)電力中央研究所（電中研）及び日本原子力研究所（原研）などからなるオールジャパン体制で研究開発を開始した。さらに、その後の研究開発については、5年程度ごとにチェック・アンド・レビューを受け、ローリングプランで進め、競争力のあるFBRサイクル技術を2015年頃までに提示することを目標としている。

フェーズⅡでは、フェーズⅠで抽出したFBRシステム及び燃料サイクルシステムに関する有望概念について、候補概念相互の可能な限り定量的な比較評価を実施できるレベルまで設計研究を深めるとともに、技術的選択の根拠を示す上で必要となる要素技術開発（データを取得する試験の実施、設計評価のための解析技術の整備等）を実施し、これらの成果を基にFBRサイクル全体の整合性に配慮しながら実用化候補概念として有望な2～3の候補を選定し、併せて必要な研究開発計画（ロードマップ）を提示することとしている。

フェーズⅡの2年目にあたる2002年度第4四半期では、2002年度の成果報告書の作成に着手した。また、2003年度末のフェーズⅡ中間取りまとめの

ための報告書作成準備を進めるとともに、フェーズⅢ以降の研究開発計画の作成に着手した。

2. 高速増殖炉システム

2002年度第4四半期は、2003年度に予定されている中間取りまとめに向けて、各炉の設計研究と要素技術開発を着実に進展させた。以下に、炉概念ごとに進捗状況を概説する。

ナトリウム冷却炉

プラント設計では、大型炉及び中型炉のシステム成立性について検討を進めた。大型炉では、炉心上部機構（UIS）等の炉内構造物を流動適正化の観点から定め、当該構造物の構造健全性を見通しを得た。中型炉では、配管からのナトリウム漏えい対策の設備設計を行うとともに、建家配置、主要機器の配置設計を行った。また、システム設計の概略を定めたことにより、運転に伴う廃棄物量を算定した。

混合酸化物（MOX）燃料を用いた炉心設計では、内部転換比を向上させ長期運転サイクルを達成できる太径ピン燃料を用いた炉心について、炉心損傷初期の即発臨界超過を防止するなどの安全性上の要求と整合させることを狙った炉心設計を継続実施中である。金属燃料炉心では、高燃焼度・高照量での変形を考慮した炉心燃料仕様について炉心特性評価を行った。また、炉心出口温度を高温化した炉心燃料仕様を設定し、炉心特性評価を行った。

安全設計では、MOX炉心に対して軸方向ブランケット一部削除集合体（ABLE）の炉心損傷事故時の再臨界回避能力について、既存試験データと解析に基づく検討に加えて、多様な炉心損傷起因事象に対するリスク低減効果の検討を継続して進めている。

要素技術開発では、大口徑配管試験のエルボ部

及び合体機器試験の管束部について試験装置を製作し、試験の予測解析を実施した。(図1)原子炉容器のコンパクト化に関する技術開発として、原子炉容器上部プレナムを模擬した縮尺モデル水流动試験を実施し、流動安定化方策を考案し、その有効性試験を実施するとともに、ガス巻き込み防止試験装置の設計・製作を完了した。

保守・補修性の検討では供用期間中検査 (ISI) の検討の方向性をまとめた。具体的には安全性、経済性のリスクの高い部位を検査が必要な箇所として選定し、機器の機能維持、構造健全性確保のために検知すべき破損の大きさを求め、検査間隔、試験装置の精度を暫定した。また、選定した検査対象部位のISIに適用可能な技術として検査技術の広範な調査を行い、ナトリウム中超音波探傷試験 (UT)、ナトリウム中目視試験 (USAM)、渦流探傷試験 (ECT)、電磁超音波探傷試験 (EMAT) を選定し、これら試験装置の実用化に向けた開発計画を策定した。

2次系簡素化蒸気発生器 (SG) 概念に関わる要素技術としては、中間媒体に鉛ビスマスを用いたSGを対象にし、伝熱管破損時に想定されるナトリウムと鉛ビスマスの反応生成物の特性確認試験を実施した。また、ナトリウム中への鉛ビスマスの注入試験を実施し、鉛ビスマスの移行挙動につい

て分析中である。

鉛ビスマス冷却炉

鉛ビスマス冷却中型炉のプラント概念の2002年度の検討では、耐震性や運転性、熱的な構造健全性の概略評価、経済性評価用のデータ整備等を実施している。また、炉心関連では昨年度構築した炉心を基に、DDI (ダクト ダクト相互作用) 防止、高内部転換を活用した高燃焼度炉心の検討、MOX炉心の検討等を実施している。

熱的健全性評価ではナトリウム炉での検討結果を基に冷却材や構造材料の相違点等から発生応力の概算の推定値を求め、構造健全性の見通しについての検討を開始した。また、2002年度の検討結果の取りまとめを行うとともに、構築した概念に対する経済性評価のための物量評価を実施している。炉心設計のDDI防止に関する検討では、2001年度構築した炉心仕様を基に評価を実施した結果、自然循環炉心及び強制循環炉心ともダクト肉厚、ダクト間ギャップの増加が必要なが分かった。これに対する炉心仕様の見直しの結果、燃料体積比の低下に伴い増殖比や炉心取出燃焼度はやや低下するものの、設計要求をほぼ達成できる見通しを得た。

要素技術開発では、ドイツ・カールスルーエ研究所 (FZK) を始め、国内外の研究所及び大学等

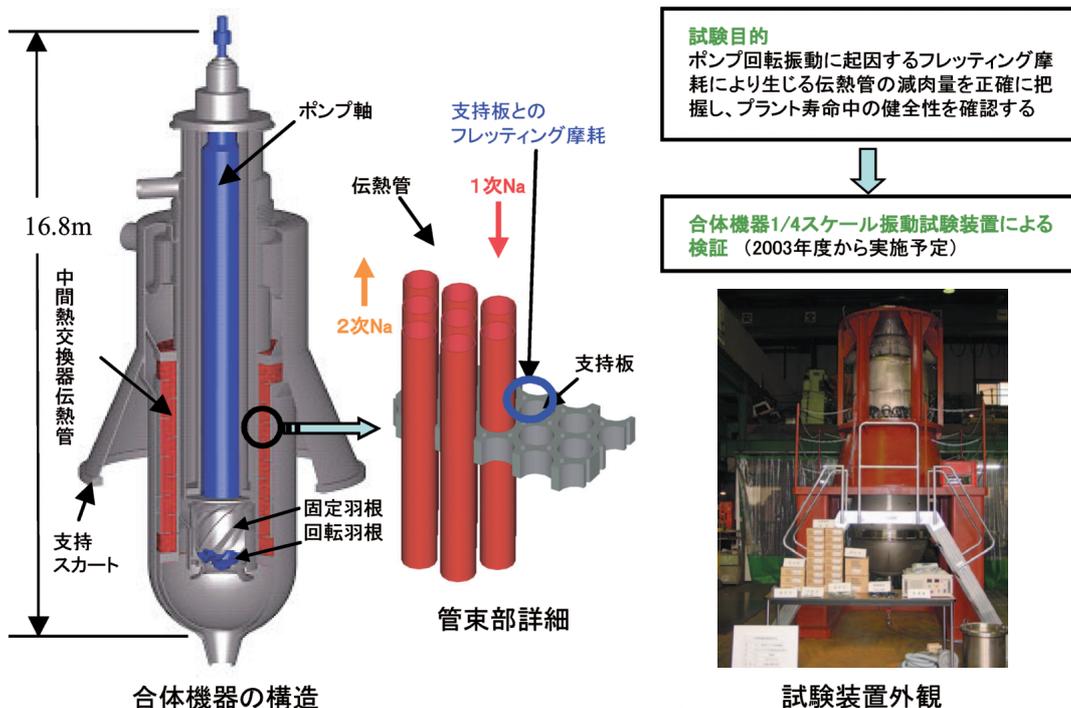


図1 合体機器の伝熱管フレットング磨耗試験

と共同で腐食特性に関する研究を実施している。2001年度より開始したFZKとの共同研究では、炉心・構造材料の耐食性確認試験について、ロシアの研究機関（IPPE）が推奨している酸素濃度制御条件における浸漬時間800～10,000時間、試験温度500～650の停留鉛ビスマス環境の耐食性確認試験を完了し、今後10,000時間試験後の試料分析を進める予定である。また、温度550、流速2 m/sec、試験時間10,000時間、酸素濃度制御環境（ 10^{-6} wt.%）の流動条件下における耐食性確認試験に着手した。

ガス炉

被覆粒子燃料型ヘリウムガス冷却炉を対象に引き続き設計研究を実施している。2001年度より検討を進めてきた横方向流・被覆層表面直接冷却型の炉心（概念1）では、取出し平均燃焼度を約100GWd/tから約150GWd/t程度にまで増加させた高燃焼度化炉心概念の検討を進め、目標とする安全性能を確保するために燃料集合体構造の工夫や、Pu富化度分布の調整による出力ピーキングの低減化方策等を取り入れた概念を検討し、安全評価を通じてこれらの方策の効果の確認を行った。

一方、被覆層破損による1次系内汚染の可能性に対応するため、燃料被覆層の外側にもう1層のバウンダリを備えた炉心概念（概念2）の検討も進めている。パラメータ解析の結果、冷却チャンネルを有する六角ブロック型容器内に被覆燃料粒子を充てんし燃料粒子間をSiCの固相マトリックスとする燃料集合体概念をレファランスとして選定した。当該概念に対する解析評価を実施し、炉心性能と安全特性について整理を行った。

概念1と概念2の炉心形態について、開発目標への適合性等の観点から比較検討を行い、ガス冷却炉のポテンシャルを評価していく上での炉心形態としては、概念1を代表概念として設計研究等を進めていくこととした。なお、ガス冷却炉の炉心形態については、今後とも国内外の炉心・燃料要素の開発動向を十分に注視し、新たな展開を図ることを含めて柔軟に対応していく予定である。

直接サイクルガスタービン方式のプラントの系統・設備概念については、炉心損傷時の概略事象推移やコアキャッチャ設備概念の検討を継続し、未臨界性の維持特性や除熱性等について概略評価を行った。また、耐高温構造対策として炉容器内部構造の熱遮へい体構造等に着眼した設計研究を

進めた。

小型炉

小型炉についてはナトリウム冷却小型炉、鉛ビスマス冷却小型炉を対象とした設計研究、並びに多目的利用として水素製造に関する検討を引き続き実施した。

ナトリウム冷却小型炉については出力150MWe、金属燃料炉心を採用した反射体制御・強制循環方式、制御棒制御・強制循環方式及び自然循環方式の3概念について炉心検討及びプラント概念の構築を実施した。炉心燃料設計では上記3概念の炉心仕様に対して安全解析を行った。その結果、炉心等価直径が大きいものの、低冷却材温度係数や低圧力損失の特徴を活かした本炉心では、炉心径方向熱膨張反応度に期待しなくても、ATWS（異常な過渡変化時のスクラム不作動事象）時に炉心損傷が発生せず、高温静定できる可能性を明らかにした。また、上記炉心は、炉心等価直径が大きいこと、物量削減の観点でより合理的な燃料仕様とする方針を検討し、新たな受動安全機能の具体化や、これの導入・活用を図った炉心燃料仕様を検討し、その特性を評価して設計データをまとめた。プラントシステム設計では反射体制御及び制御棒制御の原子炉構造並びに冷却系の検討を行い、同一の炉心等価直径に対して、制御棒制御の方が炉容器径を若干低減できるが、物量に大きな差異が無いことを確認した。また反射体の課題（交換方法、冷却方法、支持方式）について整理した。

鉛ビスマス冷却小型炉については、炉心仕様変更による安全性の見通しを把握するために、フィードバック反応度の不確かさや制御棒本数などをパラメータとした安全解析を実施して、炉心扁平化、制御棒本数低減などの炉心仕様変更の見通しを取りまとめた。

多目的利用に関する検討についてはメタンガスの水蒸気改質法による水素製造プラントを対象として、製品水素中へのトリチウム挙動の検討や水素製造プラントの配置計画などを行い、概略の水素製造単価を算出した。

炉型に共通な技術開発課題

高性能被覆管（ODS鋼）の開発では、製造コスト低減化方策の一環として、2001年度に製造した海外HIP（熱間等方加圧）素管を対象に、評価試験や国内での押出し試験を実施し、これらの結果

を基にして素管製造コスト低減効果をまとめた。また、2001年度に製造した中空キャプセル大型素管から長尺被覆管製造試験を実施し、実機製造プロセスの実現見通しを評価した。ODS 鋼被覆管の強度特性に及ぼす過剰酸素効果についても評価を進めた。

ロシアBOR 60炉でのODS 鋼被覆燃料ピン先行照射試験のため、日本より発送した上部端栓付の照射用ODS 鋼被覆管は、2003年1月にロシア・原子炉科学研究所(RIAR)に到着した。同年2月にRIARにて照射実験に関する技術会議を行い、照射燃料ピンの設計・製造仕様を確定した。BOR 60照射試験開始は2003年6月末を予定している。

「常陽」での照射試験については、2007年にODS 鋼被覆燃料ピンのキャプセル照射試験を開始する予定で準備を進めている。燃料ペレットを充てんした後の下部端栓溶接は、コスト低減化を図るためにレーザ溶接の適用を検討しており、溶接部の強度特性を評価している。

超ウラン元素(TRU) 酸化物燃料ピンについても「常陽」での照射計画の立案・調整を継続して実施している。

再臨界回避概念成立性を見通すためにカザフスタンで実施している試験研究(EAGLE プロジェクト)では、炉外試験について融体生成技術の検討を継続するとともに2003年度以降実施されるナトリウムを用いた試験のための設備設計を具体化し製作に着手した。炉内試験については、IGR(黒鉛減速パルス出力炉)の駆動炉心と試験燃料の核的結合係数を把握するための予備試験を実施し、その結果に基づき試験体設計を具体化するとともに、試験実施に向けて試験体製作、許認可手続き、手順具体化等の準備を進めた。

自己作動型炉停止機構(SASS)の開発では、誤落下等に対する信頼性を確認すること等を目的とした「常陽」炉内試験に向けた準備を進めている。電気事業者の電力共通研究により進めていた炉内装荷用のSASS 試験体製作が完了した。2004年5月より炉内試験を開始する予定である。

構造設計手法については革新的構造概念の検討として、様々な非弾性解析モデルを現状設計の原子炉容器液面近傍の損傷評価に適用し、同部位が非弾性挙動を示すこと、及び有意な累積非弾性ひずみが生じることを把握した。SGの球形管板の設計手法については、初期段階として、多孔平板形

状を対象として、円孔まわりの局所的な複雑形状の簡易な形状による置換を行い、簡易モデルを積み上げて管板全体モデルを作成した。これにより手動トリップ時の熱過渡に対する挙動を解析し、巨視的には塑性ひずみが生じる可能性が低いことを把握した。

12Cr 鋼の開発では、(a)配管材の熱処理条件案の提示、(b)タングステンの中添加材及び無添加材(以下、「2 鋼種」という。)の特性評価試験の実施、(c)2 鋼種の継ぎ手試験と短時間特性試験の実施、(d)火力仕様12Cr 鋼及び2 鋼種の熱時効試験の実施、(e)FBR 候補熱処理材についてクリープ疲労試験、(f)ナトリウム中クリープ疲労試験装置の整備を行った。

3次元免震システムについては、ナトリウム冷却中型炉及び鉛ビスマス冷却中型炉に対するプラント耐震設計の成立範囲を検討し、ナトリウム冷却中型炉の建屋全体3次元免震方式及び建屋水平免震+機器上下免震方式に対する要求条件が上下振動数3 Hz程度、上下減衰率20%程度であること、鉛ビスマス冷却中型炉の建屋全体3次元免震方式に対する要求条件が上下振動数0.67Hz程度、上下減衰率20%程度であること及び建屋水平免震+機器上下免震方式では、免震装置の配置が困難であり適合しないことが分かった。3次元免震構造設計手法の検討としては、3次元免震応答低減方策の検討、地震応答解析における支持地盤のモデル化の影響検討、原子炉容器の座屈評価及び制御棒挿入性評価の精緻化について技術的知見を整備した。

3. 燃料サイクルシステム

再処理システム及び燃料製造システムの概念ごとのシステム設計研究及び要素技術開発の進捗状況を概説する。

(1) 再処理システム

システム技術開発では、フェーズIの成果及び2001年度の機器・設備概略検討結果、燃料組成変動に対する運転モード検討結果等を基に、プラント全体の操業性を考慮したシステムフローの検討を進め、2002年度の設計作業をまとめた。

先進湿式法

システム技術開発では、代替・補完技術について、超臨界流体直接抽出法を採用した小型プラントの経済性見通しを得るとともに、試験検討に基

づき抽出クロマトグラフィ（イオン交換）やアミン抽出法のフローシートを策定した。また、代替・補完技術の採否を含め、システム実用化のための枢要技術を洗い出すとともに、要素技術開発とシステム技術開発の整合に留意したロードマップの検討に着手した。

高レベル放射性物質研究施設（CPF）においては、2002年12月の溶解試験に引き続き、溶媒抽出試験、直接抽出試験、晶析試験等のホットプロセス試験を実施した。

乾式法（酸化物電解法，金属電解法）

酸化物電解法については、RIARで実施した電共研試験のデータの評価を行った。本試験は、酸化物電解法の枢要技術であるMOX燃料電解共析工程において、実際の使用済燃料の処理を想定して複数の核分裂生成物（FP）イオンを溶融塩中に添加し、電解がどのような影響を受けるかを調査するものであり、電流効率や析出顆粒のPu富化度に対する核物質濃度、不純物濃度等の影響の把握を進めた。

金属電解法については、電中研との共同研究に基づきCPFに設置したPu試験用設備において、放射性物質を用いないコールド試験を引き続き行い、試験装置の性能を確認した。また、電中研と原研との共同研究においては、原研大洗研究所のアルゴン雰囲気グローブボックス内に設置した小規模電解槽を用いて実施している液体Cd陰極中へのPu、U及びAmの共析試験、Cd陰極インゴットを対象とした陰極回収金属試験のために将来的に同グローブボックス内への設置を想定して試作された蒸留試験装置の昇温性能試験などを継続実施した。

高速電解精製装置及び還元抽出装置に関しては、電中研の公募研究として、工学規模装置の試験に向けた設計・製作が開始された。

(2) 燃料製造システム

システム技術開発では、セル内配置設計方針の具体化と、主要設備に対する機器概念、マテリアルハンドリング設備、ライン構成の検討及びセル内機器配置設計を実施している。今期においては、2002年度の設計作業のまとめを行った。

簡素化ペレット法

システム技術開発に関し、量産・遠隔操作に対応した機器・設備概念及び製造ラインの構成について検討した。また、セル内での製造より、機器

の運転・保守・補修性や安全性の検討により、設備能力やバッファ容量の定量化を図った。

ショートプロセス製造技術については、外部評価に係る研究開発成果取りまとめ作業を進めると共に、製品ペレット燃料の品質保証に関する評価等を実施した。低除染TRU燃料開発については、Amを含有する高除染MOX燃料ペレット及びAm/Npと模擬FPを添加したペレット燃料について、照射条件と燃料仕様を検討し、照射試験の詳細検討を実施している。

振動充てん法

今後の振動充てん法の評価に向けたゲル化試験や振動充てんに関する小規模ウラン試験の実施に備えて試験設備の整備を進め、東海事業所の応用試験棟にウラン試験用のフードの設定を終了した。このほか、模擬物質による金属ウランゲッター充てん試験等、振動充てん条件の最適化のための試験を進めた。

またスイス・ポールシェラー研究所（PSI）との共同研究において、オランダHFR炉で2003年より振動充てん燃料照射試験を計画している。PSIにおける照射用燃料の製造に備えた製造試験を行い、球状粒子燃料、模擬塊状粒子燃料、比較照射用ペレット燃料とともに所定の仕様を満足できる見通しを得た。また、今夏の完成を目指して照射燃料の製造を開始した。

鑄造法

電中研 原研共同研究で予定しているU-Pu-Zr単スラグ作成試験用に設計・試作した射出成形装置でCu-Zr等の模擬物質を用いた射出成型試験により装置の性能試験を継続した。また、原研大洗研究所に設置予定の新規グローブボックス及び射出成形装置の具体的な設計を行った。さらに、製造した燃料ピンの「常陽」による照射に向けた実施体制や分担が整った。

(3) その他

新リサイクル技術（ORIENT cycle）¹⁾については、昨年度検討の詳細化を図るとともに、分離技術を中心とした革新プロセスの創成にむけてのアクションプランを検討している。今期は新しい分離技術の検討を進めるため、若手を中心としたワーキング・グループによる検討を開始した。ORIENT cycleは核燃料サイクル全体を見渡して分離スキームを最適化する概念であるので、ワーキング・グループでは分離技術者のみならず廃棄物等

幅広い分野のメンバーが集い議論を行っている。

4. 統合評価

FBRサイクル総合評価技術委員会を開催し、研究開発ロードマップ及び導入シナリオについて外部の専門家との討議を行い、それらの基本構成に関する意見を聴取した。また、環境負荷低減に関する原研との研究協力会議を開催し、超寿命核分裂生成物(LLFP)の分離及び核変換に関するシステム設計、高レベル放射性廃棄物の地層処分に対する分離変換の効果などについて議論した。

導入シナリオ関連の研究開発については、内部転換比を高めて、単位発電あたりの必要燃料量を削減し、より高い経済性を狙った炉心などを対象とした物質収支計算並びにFBR導入シナリオの検討を行い報告書に取りまとめるとともに、原子力学会において口頭発表した。また、フェーズⅡ中間評価に向けた導入シナリオの予備解析/評価を行い、現時点でのFBRサイクル導入シナリオの特性を明らかにした。さらに、高速炉による水素製造技術に関する国際会議への論文を大洗工学センター要素技術開発部の新材料研究Gr.と共同で作成した。

解析ツール開発関連については、開発戦略へのファイナンス理論^{*1}の応用として、FBRサイクル研究開発の選択オプション、開発期間、投資資金などを設定し、意思決定評価システムのプロトタイプの適用性を検討した。また、新型被覆管の研究開発シナリオにおける柔軟性の評価を試みた。投資対効果の評価に関しては、FBRサイクルを世界的に導入した場合の効果も取り入れた解析検討を実施した。評価指標については、FBRサイクルと他電源との比較評価のため、エネルギーセキュリティ、社会的受容性、核拡散抵抗性、技術的実現性などの指標と評価手法を提案し、予備的評価

を実施した。諸量解析コードについては、FBR導入量の自動調整機能、軽水炉で回収されるマイナー・アクチニド(MA)のFBR受入オプション機能の追加、計算結果出力機能の整備などを実施し、技術報告書としてまとめた。ファイナンス理論の適用と社会的受容性の検討については、原子力学会において口頭発表した。

FBRサイクルデータベースの約7千件の登録資料情報で、開示区分が不明であった約4千件の登録内容をチェックし、公開/非公開の明示、発行日、出典などの修正や追加を実施した。また、本データベースシステムの検索機能の一部をサイクル機構のイントラネットに公開し、内部利用を図った。設計情報データベースについては、フェーズⅡ中間評価のための整備をほぼ終了し、システム設計関係者にデータシートと技術的な総括のための整理表の内容を説明して配布した。

FBRシステムのリスク評価については、ABLE型炉心の溶融燃料排出の有効性について現象論を整理し、イベントツリー^{*2}によるリスク特性の検討を実施した。また、ガス冷却炉及び鉛ピスマス冷却炉のリスク評価報告書を作成している。燃料サイクル施設のリスク特性把握については、乾式システムのリスク分析を実施し、溶融塩の漏えい、金属火災、射出成形装置での臨界について、事象発生原因及び放射能放出シナリオを展開した。また、放射性物質放出事象による放射線被ばくリスクの検討について報告書を作成している。

参考文献

- 1) 野田 宏, 山下英俊, 他: “高速増殖炉サイクルの実用化戦略調査研究 フェーズⅡの2001年度成果”, サイクル機構技報, No.16, 16-1 (2002).

(本社：経営企画本部
FBRサイクル開発推進部)

* 1 ファイナンス理論：ファイナンス（金融）部門における投資選択やリスク管理などにおいて用いられている理論を指す。ポートフォリオ選択理論やオプション価格理論などが知られており、これらを基礎とした「金融工学」が最近注目されている。

* 2 イベントツリー：起因事象発生時にその拡大を防止するためにあらかじめ設けられている安全機能のうち、どれが成功し、どれが失敗したかの組み合わせを考えて、事故の進展ケースを分類するための系統図。