

蒸気リフトポンプ方式の鉛ビスマス冷却沸騰水型小型高速炉の概念設計と研究開発

原子炉工学研究所
原子核工学専攻
高橋 実

目次

はじめに
蒸気リフトポンプ方式の鉛ビスマス冷却炉概念

概念設計
研究開発
おわりに

1. はじめに

高速炉の冷却材として鉛ビスマス共晶合金(45%Pb-55%Bi)を用いると、中性子経済が良好で転換効率が高く長寿命炉心、アクチニド燃焼、負のボイド反応度など核的に優れた特性を期待できます(図1)。鉛ビスマスは融点(125°C)が低いいため取り扱いが容易で除熱性能も良好であり、沸点(1670°C)が高いためナトリウムのような事故時の沸騰による冷却材喪失の問題が除外でき、空気や水と触れてもナトリウムのように激しく化学反応を起こさないなど安全性に利点があります(表1)。また、鉛ビスマス冷却炉は長寿命炉心による核拡散抵抗性の向上、アクチニド燃焼による環境負荷の低減、増殖によるウラン資源の有効利用、立地多様化など要件を満たす、革新的原子炉として期待されています。

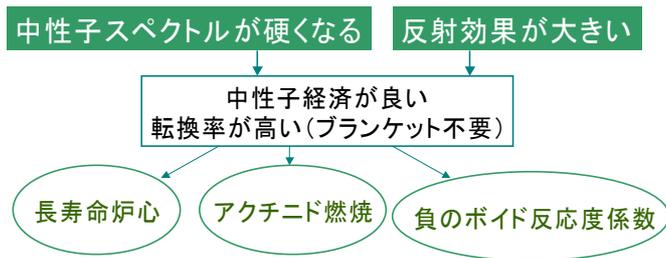
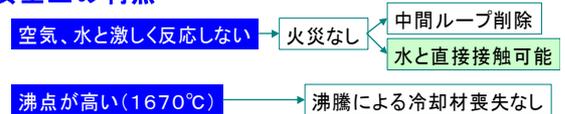


図1 鉛ビスマス冷却炉の特徴

表1 高速炉用液体金属冷却材の比較

冷却材	中性子吸収断面積(mb)	融点(°C)	沸点(°C)	化学反応性(空気、水)
Na	2.35	98	883	強い
Pb	2.75	327	1737	弱い
Pb-Bi	3.82	125	1670	弱い

安全上の利点



問題点

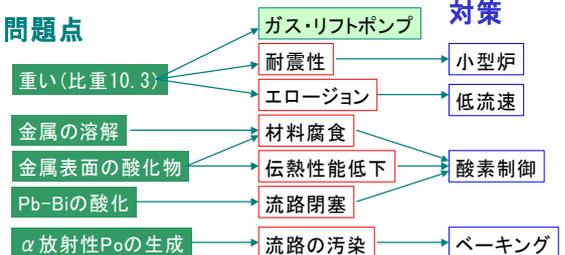


図2 鉛ビスマス冷却炉の利点、問題点と対策 (青・緑：利点、緑・赤枠：問題点、青枠：対策)

鉛ビスマス冷却材の短所は、比重が大きいため耐震設計上小型炉に限られること、被覆管材料や構造材料の溶解腐食・酸化腐食とエロージョンを起こしやすいこと、鉛ビスマス固体酸化物の生成による流路閉塞等の問題、ビスマスの中性子照射によるアルファ放射性核種のポロニウム(210Po)の生成と汚染、伝熱面の酸化膜形成による伝熱性能の低下があげられます。図2にその概要と対策をまとめました。

2. 蒸気リフトポンプ方式の鉛ビスマス冷却炉概念

小型炉は大型炉に比べて経済性に劣るため、機器の簡素化が必要です。その方策として蒸気リフトポンプによる電磁ポンプや機械式ポンプの削除と、鉛ビスマス中への直接給水による蒸気発生器の削除が有効です。鉛ビスマスは比重が大きいため蒸気リフトポンプが効果的に働きます。炉上部の鉛ビスマス中に給水するとチムニー内に蒸気泡が充満し、その浮力によって鉛ビスマスに上昇力が得られダウンカマーを下降

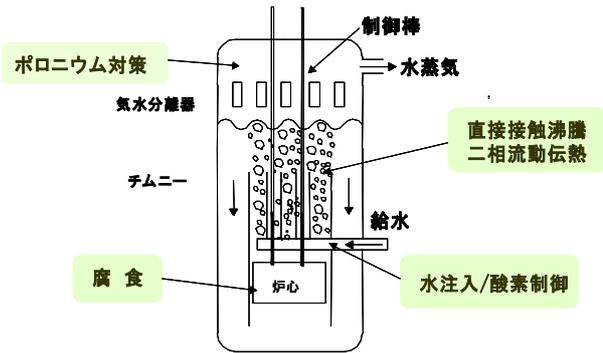


図3 蒸気リフトポンプ方式の鉛ビスマス冷却炉PBWFRの概念

して再び炉心に流入する循環が可能です(図3)。これは鉛ビスマスと水や蒸気が接触しても化学的に不活性であることを積極的に利用したものです。直接接触による沸騰では水と鉛ビスマスの間に伝熱管のような隔壁がないため、熱伝達率は著しく大きくなる可能性があり、蒸気発生部の小型化も期待できます。

このような原子炉を鉛ビスマス冷却直接接触沸騰水型小型高速炉(Pb-Bi Cooled Direct Contact Boiling Water Fast Reactor)と称し、略称PBWFRと呼んでいます。冷却材循環ポンプ、蒸気発生器、中間熱交換器、中間冷却ループが削除でき、ナトリウム冷却高速炉と強制循環方式の鉛ビスマス冷却高速炉に比べると大幅な機器の簡素化がはかられます。

3. 概念設計

電気出力150MWのPBWFRの鳥瞰図と主要諸元を図4と表2にそれぞれ示します。電気出力はスケールメリットを考慮し小型炉としては最大としました。鉛ビスマスによる腐食を防止するため、被覆管最高温度を650°Cに設定しました。この温度の制約から、鉛ビスマスの炉心出口温度は460°C、炉内の昇温を150°Cとすると鉛ビスマスの炉心入口温度は310°Cとなります。蒸気条件は沸騰水型軽水炉並みの圧力7MPa、温度296°Cとし、鉛ビスマス自由液面上への未沸騰水の蓄積を防ぐため蒸気温度に10°Cの過熱度をもたせました。サイクル熱効率は33%ですが、耐腐食材料の開発により高温化が達成できればサイクル熱効率の向上が期待されます。

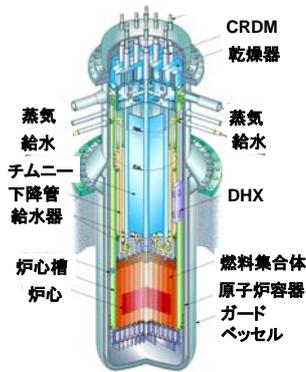


図4 電気出力150MWの蒸気リフトポンプ方式の鉛ビスマス冷却沸騰水型小型高速炉

表2 PBWFRの主要諸元

電気出力/熱出力	150 MWe / 450 MWt
サイクル熱効率	33 %
Pb-Bi 炉心入口温度/出口温度	310 °C / 460 °C
Pb-Bi 流量/蒸気流量	73,970 t/h / 863 t/h
蒸気圧力	7 MPa
給水温度/蒸気温度	220 °C / 296 °C
被覆管最高温度	620 °C (center)

炉心はプルトニウム・ウラン窒化物燃料の2領域炉心(図5, 表3)とし、ブランケットは上部のみとしました。燃料直径・配列ピッチ比 $p/d=1.3$ で圧力損失と燃焼度が最大になる最適な燃料棒直径は12mmになりました。炉寿命15年間における燃焼反応度欠損は1.5% dk/kk', 最高線出力は内側炉心で減少し、外側炉心で増加します。増殖比は燃焼初期に1.25, 末期に1.05, ボイド反応度は-3ドルです。

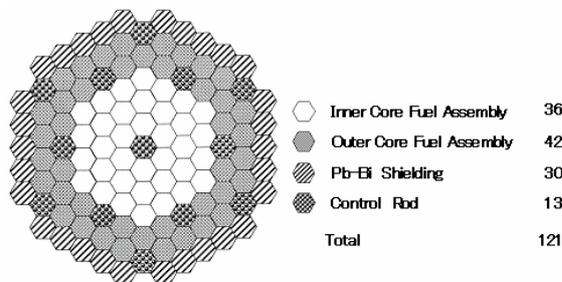


図5 炉心構成

表3 炉心設計

炉心	型	均質
	領域	2領域
燃料	Pu-U 窒化物 (N ¹⁵ 100%)	
炉心	等価直径	267 cm
	高さ	100 cm
ブランケット	径方向	なし
	上部	30 cm
	下部	なし
Pu 富化度	内側領域	11.5 w/o
	外側領域	15.8 w/o
炉心燃料のU ²³⁵ の比率	0.3 w/o	
最高線出力	396 W/cm	
燃焼反応度損失	1.5 %dk/kk'/15 yrs	
増殖比	>1.05	
燃焼度	110 GWd/t	
ボイド反応度	炉心	\$7.4 (寿命末期)
	炉心,軸方向ブランケット,ブレナム	\$-3 (寿命末期)
燃料束の摩擦損失	0.04MPa	
燃料交換	間隔	15 years
	バッチ数	1

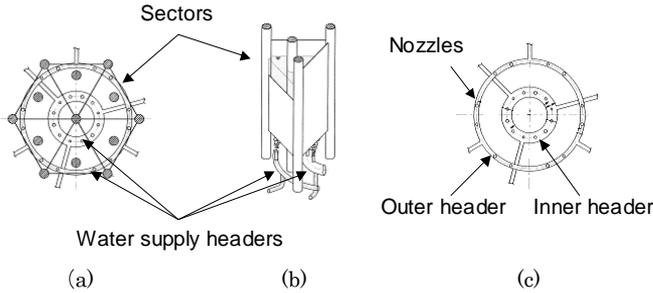


図6 炉心上部のチムニーと給水ヘッダー

炉心上部のチムニーと給水ヘッダーの構造を図6に示します。チムニーは6分割セクター構造とし、チムニー高さは過熱蒸気が生成可能な伝熱距離から3mとしています。内側と外側の給水リングヘッダーにそれぞれ24個のフルコンノズルを設け、各ノズルから流量360L/minで水が注入されます。燃焼に伴い内側・外側炉心出力比が変化するので、内側と外側のリングヘッダーの給水流量配分は燃焼の進行に伴って調節されます。

蒸気リフトポンプの性能は、蒸気泡がチムニーの断面内に均一に分布し、鉛ビスマスとの相対速度が小さいほど良好です。このようなポイド率分布を実現させるために試験および解析による研究を行っています。

蒸気流中の鉛ビスマス液滴を除去するため、炉上部にサイクロン式ミストセパレーターとシェブロン式ドライヤーを設けています(図7)。これは、蒸気が炉容器内の鉛ビスマス液面を通過する際に液滴が発生し、蒸気流に同伴されて上昇し蒸気系を経てタービン翼の壊食(エロージョン)や脆化を起こす可能性があるからです。鉛酸化物や構造材料の酸化物も固体微粒子のエアロゾルとして蒸気流に同伴されます。液滴の蒸気系への移行はポロニウム(Po, PoH)による放射能汚染も引き起こします。試算によると、セパレーターの液滴分離効率は95.5%、ドライヤーの分離効率は2.6%、合計98.1%の液滴が除去され、ドライヤー出口液滴流量は $4.8 \times 10^{-4} \text{kg/s}$ (15.2t/y)、蒸気流量に対して $2.0 \times 10^{-4}\%$ の比率であることがわかりました。軽水炉の2.0%~5.0%に比べると非常に少ないためエロージョンは問題にならず、タービン翼表面の脆化もセラミックス被覆を施せば防止できると考えていますが、液滴流量をさらに低減化する研究が必要です。

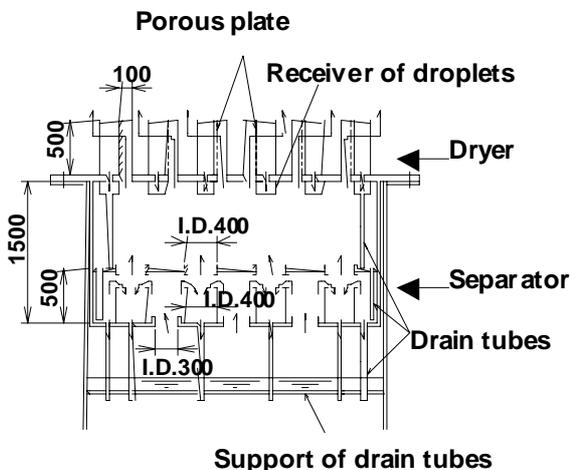


図7 炉上部のミストセパレーターとドライヤー



図8 鉛ビスマス循環試験装置

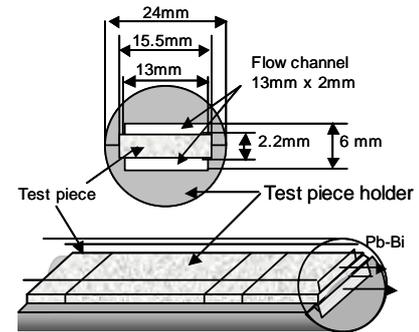


図9 腐食試験部

4. 研究開発

(1) 耐腐食材料の開発試験

鉛ビスマス冷却炉の開発における重要課題は、鉛ビスマスと共存性の良好な炉心・構造材料の開発です。材料腐食は鋼材元素の鉛ビスマス中への溶解(溶解腐食)と鉛ビスマス中の酸素による鋼材の酸化(酸化腐食)に支配され、鉛ビスマス中の酸素濃度を適切に制御すれば、表面に薄い腐食防護酸化膜が形成されて溶解腐食と酸化腐食のいずれも抑制されることがわかっています。そこで、鉛ビスマス循環試験装置(図8)を用いて各種鋼材の腐食試験を行っています。試験片は平板状のモリブデン製ホルダー内に並べて挟み、その上下の狭い隙間に550°Cの鉛ビスマスが平均速度2m/sで1,000時間流します(図9)。その後試験片をグリセリン洗浄し、電子顕微鏡観察により腐食状態を調べています。一方、エロージョンは鉛ビスマスの浸透により強度が低下した材料表面の一部が流体力によって削り取られる現象と考えられ、比重が大きい鉛ビスマスでは激しく起こる場合があるため、エロージョンの防止も重要課題となっています。

(2) 鉛ビスマス-水直接接点沸騰試験

高温の鉛ビスマスに直接給水する場合の熱流動現象を調べるため、鉛ビスマス-水直接接点沸騰試験装置(図10, 図11)を建設しました。この試験では、4本ピン模擬燃料束で鉛ビスマスを電気加熱して自然循環させ、燃料束出口に給水して円筒型チムニー内に鉛ビスマス-水-蒸気の沸騰二相流を形成させ、蒸気リフトポンプ効果と伝熱特性を調べています。はじめに、起動から運転、停止までの操作を実機温度・圧力条件



図10 鉛ビスマス-水直接接触沸騰試験装置

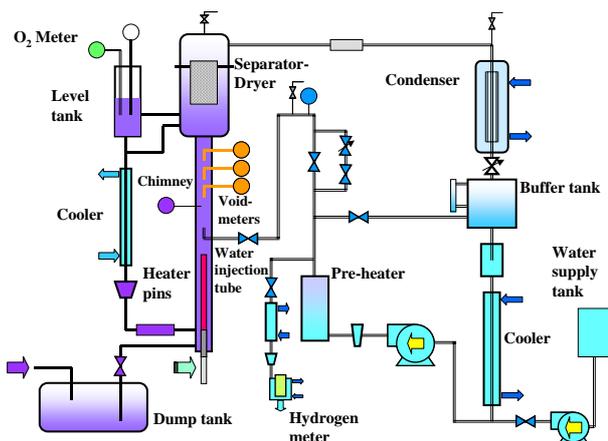
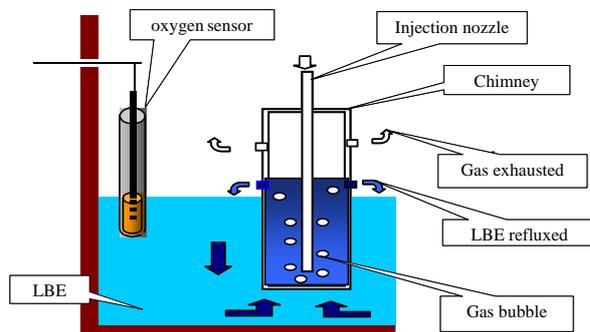


図11 鉛ビスマス-水直接接触沸騰試験装置の系統図

で実証し、さらに二相流のボイド率と圧力特性および直接接触による沸騰伝熱特性を明らかにする試験を行っています。また、この現象を模擬する2次元二相流解析評価コードを開発しています。さらに、実機のダウンカマーに相当する下降管部に電磁流量計と超音波流量計を設置し鉛ビスマス用流量計

の開発試験も行っています。これまでの試験で安定な流動が実現されています。



Schematic of The Test Section

図12 鉛ビスマス中水蒸気注入酸素制御試験装置試験部

(3) 鉛ビスマス中水蒸気注入酸素制御試験

鉛ビスマス中への給水により鉛ビスマス中酸素ポテンシャルが変化すると、鉛酸化物 PbO の生成や材料腐食が促進され、流路の閉塞や材料損傷の問題に至ります。そこで鉛ビスマス中に水蒸気を吹き込む場合の鉛ビスマス中の酸素濃度制御技術と固体電解質酸素センサーを開発しています(図12)。

(4) ベーキング法によるポロニウム除去試験

ポロニウムは鉛ビスマス中だけでなく水蒸気中にも移行し、蒸気系を汚染します。これが冷却系バウンダリーに閉じ込められている通常運転時には問題ありませんが、蒸気が外部に漏れたりメンテナンスのためにバウンダリーを開放する場合に被曝が問題になります。そこでメンテナンス時にポロニウムを除去するベーキング法の技術開発試験を行っています。

5. おわりに

蒸気リフトポンプ方式の鉛ビスマス冷却炉の概念設計、流動鉛ビスマス中の鋼材腐食試験、鉛ビスマス中給水時蒸気リフトポンプ性能と沸騰伝熱性能の実証試験、鉛ビスマス中蒸気吹き込み時の酸素制御・計測技術開発およびポロニウム除去試験を行い、多くの成果が得られている。

本研究は文部科学省平成14年度革新的原子力システム技術開発公募事業「Pb-Bi冷却直接接触沸騰水型小型高速炉に関する技術開発」により実施した。