

資源エネルギー庁長官賞

「省エネ型ヒートポンプ式アンモニア回収装置」

木村化工機株式会社

1. 装置の詳細説明

(1) 装置概要

本装置は、化学・食品・半導体工場等のアンモニア含有排水からアンモニアを回収し、再利用することを目的とした装置である。

本装置は主に、第一蒸留塔、第二蒸留塔、熱回収コンデンサ、アフターコンデンサ、リボイラ、ヒートポンプから構成される。アンモニア含有排水は、予熱器で昇温された後、第一蒸留塔の上部から供給される。第一蒸留塔のアンモニア蒸気は熱回収コンデンサに供給され、分縮操作によってアンモニア蒸気が積極的に後段の第二蒸留塔へ抜き出され、更に蒸留される。第二蒸留塔のアンモニアガスはアフターコンデンサにより凝縮されて高濃度のアンモニアガスとなり、吸収塔で濃度調整され 25wt%のアンモニア水として回収される。なお、第一蒸留塔から出るドレン排水は、リボイラで加温されて第一蒸留塔の加熱源となるとともに、一方では予熱用に利用された後、アンモニア濃度約 10ppm の処理水として排出される。

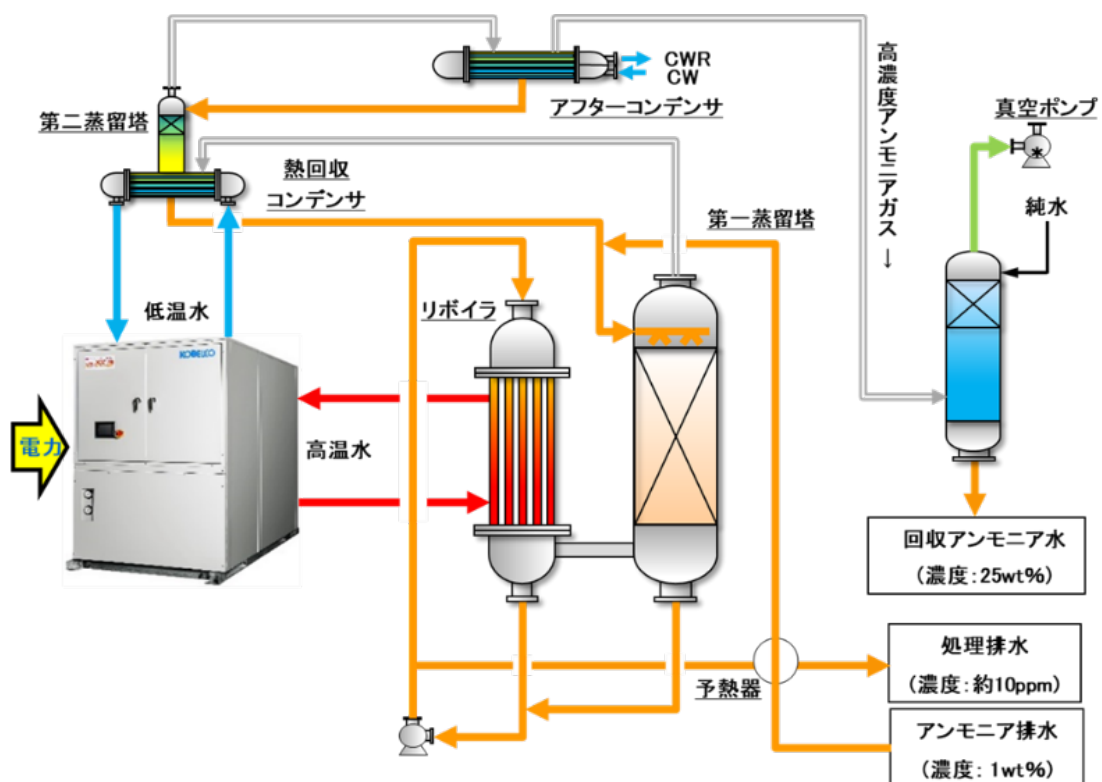
従来、アンモニア回収はスチームストリッピング法が主流であるが、蒸留のための蒸気をボイラ等から外部供給する必要があり、排熱回収もほとんど行われないため、エネルギー消費量が多い。一方、本装置は、COP (Coefficient Of Performance : 成績係数、加熱能力(kW)/投入電力(kw)) の高いヒートポンプを採用することにより、熱回収コンデンサの冷却水から廃熱を回収してリボイラの熱源に再利用し、また、第二蒸留塔では、ヒートポンプの余剰熱を加熱源として利用するためリボイラを必要としない。そのため、1wt%アンモニア含有排水から 25wt%のアンモニア水を回収することを目的としたスチームストリッピング式と比較して、一次エネルギー投入量を 81%、CO₂排出量を 83%削減することが可能となった。

(2) 装置詳細

図表 1 が本装置のフローである。高 COP ヒートポンプを用いることで、回収部と濃縮部の中間に設けた熱回収コンデンサの冷却水から廃熱を回収し、リボイラの熱源として再利用が可能である。なお、この熱回収コンデンサ内でアンモニアを含むベーパー全量が凝縮すると露点降下を起し、ヒートポンプの加熱 COP 低下を招く。そこで、熱回収コンデンサで分縮操作をすることにより、アンモニアを積極的に後段へ抜き出して第二蒸留塔で更に蒸留することにした。なお、ヒートポンプの加熱量には、回収熱量に加えてヒートポンプ動力が加わることにより余剰熱が発生する。第二蒸留塔ではこの余剰熱を活用するため、リボイラを必要としない。アフターコンデンサからは、高濃度アンモニアガスで抜き出し、吸収塔で濃度調整して 25wt%アン

モニア水として回収できる。ちなみに、1wt%アンモニア水を蒸留塔に供給し、塔頂から高濃度に濃縮されたアンモニアガス、塔底から約10ppm低濃度排水が出る場合、スチームストリッピング式と比較して、一次エネルギー量およびCO₂排出量が大幅に削減でき、さらに25wt%アンモニア水が回収できる。

なお、一次エネルギー削減率及びCO₂排出削減率については、後の項で説明する。



図表1 ヒートポンプ式アンモニア回収装置フロー

2. 開発経緯

(1) 開発経緯

1999年	内部熱交換型蒸留塔「HIDiC」ベンチプラントによる100時間以上の連続運転に世界で初めて成功
2002年～2005年	内部熱交換型蒸留塔「HIDiC」パイロットプラントによる1,000時間の連続運転、エネルギー使用量60%削減に成功
2010年	ヒートポンプを活用した省エネ型蒸留装置の開発を開始
2019年	ヒートポンプ式アンモニア回収装置の発明 ヒートポンプ式アンモニア回収装置の実証試験に成功
2025年	第1号機納入

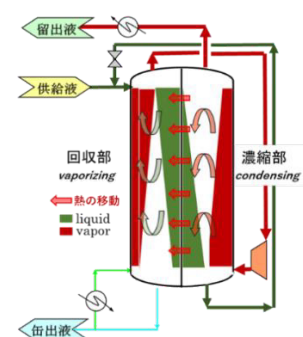
以下に、上記開発経緯の詳細を述べる。

1993年から2000年まで、新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）において、国家プロジェクトとしてのニューサンシャイン計画が実行され、その一環として石油化学産業分野を対象に「内部熱交換による省エネ蒸留技術」の基礎研究が開始され、そのプロジェクトに参画した当社と丸善石油化学は、1999年、「究極の省エネ型蒸留装置」とも言える「内部熱交換型蒸留塔、通称「HIDiC」（ハイディック）」のベンチプラントで、世界で初めて100時間以上の安定した連続運転に成功した。

さらに、2002年からのNEDO「内部熱交換による省エネ蒸留技術開発プロジェクト」に、他の機関とともに共同参画し、丸善石油化学構内に建設したパイロットプラントで1,000時間の連続運転を達成し、さらに従来の蒸留塔に比べてエネルギー使用量を60%削減することに成功した（図表2）。

2010年には、HIDiCにおける当社の功績を高く評価した（一社）日本エレクトロヒートセンサーが、ヒートポンプを活用した省エネ型蒸留装置の開発を当社に依頼した。そして、6年間かけて当社はヒートポンプ式メタノール蒸留装置（図表3）の開発に成功し、蒸留工程における大幅な省エネ化を実現した。

化学工学的に理想の蒸留装置 HIDiC(内部熱交換型蒸留塔)



回収部から濃縮部への蒸気を昇圧(昇温)し、濃縮部から回収部へ熱移動させる。理論上、最も省エネルギーとされている。

1999年 世界初 理論実証に成功



ベンチプラント(1999)



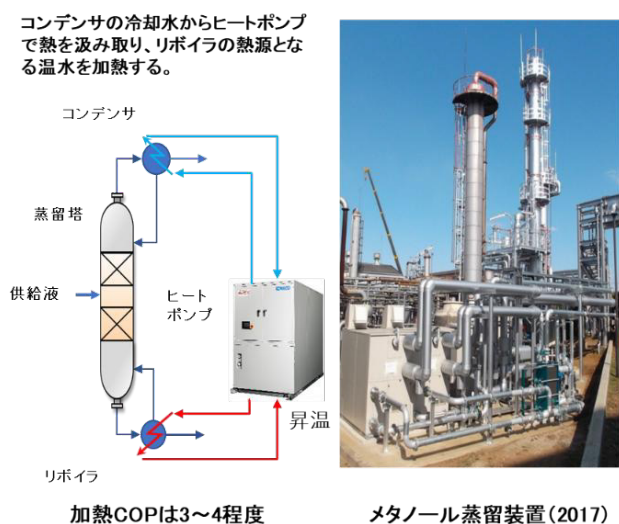
パイロットプラント(2005)

図表2 当社が開発したHIDiC(内部熱交換型蒸留塔)

しかし、この時に採用していたヒートポンプは、加熱 COP が 3~4 であり、省エネ性が十分ではなく、費用対効果を発揮できないという課題があった。

そこで、これまで最高 40℃までの排温水から熱回収して 70~90℃の温水供給に対応していたヒートポンプであったが、60~75℃の高温熱源水から 95℃の高温水を最大加熱 COP 7.5 で取り出せる、新開発されたコベルコ・コンプレッサ製ヒートポンプを採用した。これは、「ヒートポンプ式蒸留装置」の温度バランスに適したものとなっている。そして、当社は、このような高 COP ヒートポンプを用いることで、蒸気の使用量を削減でき、それにより CO₂を大幅削減できる省エネ型ヒートポンプ式蒸留装置を複数発明した。その中でヒートポンプ式アンモニア回収装置も発明された。

そして、ヒートポンプ式アンモニア回収装置については、2019 年秋に実証試験（図表 4）を行い、従来のスチームストリッピング式と比較して、ランニングコストは最大 6 分の 1（当社比）、一次エネルギー削減率 81%以上（原油換算）、CO₂削減率 83%以上と大きい削減効果を出すと同時に、濃度 1~2%の希薄アンモニア水から濃度 95%以上の高濃度アンモニアガスが回収できることを確認できた。



図表 3 当社が開発したヒートポンプ式メタノール蒸留装置



【実証試験装置の概要】

- ・処理量 : max 3t/h
- ・供給液アンモニア濃度 : 1~2 wt%
- ・処理排水アンモニア濃度 : 10ppm以下
- ・塔頂アンモニアガス濃度 : 95wt%
- ・回収アンモニア水濃度 : 25 wt%
- ・ヒートポンプ加熱出力 : max 320kW
- ・ヒートポンプのCOP : max 7.5

ランニングコストは従来型の最大6分の1(当社比)
 一次エネルギー削減率 81%(スチームストリッピング式との比較)
 CO₂排出削減率 83%(スチームストリッピング式との比較)

図表 4 当社尼崎工場内の実証実験装置

(2) 共同開発
なし

(3) 技術導入
なし

3. 独創性

本装置は、アンモニア水の蒸留において熱負荷が大きい回収部から高温の熱源水を回収して高効率ヒートポンプで昇温後、リボイラ熱源に活用するものである。

これにより、大幅な省エネルギー効果と CO₂ 排出削減効果を得ることができた。

本装置における特長的な改善点は、下記のとおりである。

(1) 蒸留プロセスフローの改善

新規開発した高加熱 COP 仕様のヒートポンプを効果的にシステムに組み込むことで、大幅な省エネルギーを達成することを目指し、次の項目に示す“プロセスフローの改善”を行った。

1) 熱回収コンデンサの追加

熱負荷が大きい回収部から高い温度の熱源水回収を目的に、蒸留塔の中間に熱回収コンデンサを新たに設置し、同熱を回収してヒートポンプサイクルで昇温後、リボイラ熱源に活用した。同コンデンサを効果的に追加したことで、ヒートポンプの蒸発と凝縮の温度差が縮まり、高加熱 COP を実現できた。

2) 第二蒸留塔の設置

熱回収コンデンサ内でアンモニアを含むベーパー全量が凝縮すると露点降下を起こし、ヒートポンプの加熱 COP 低下を招くため、同コンデンサで分縮操作することにより、アンモニアを積極的に後段へ抜き出して第二蒸留塔で更に蒸留することとした。なお、ヒートポンプの加熱量には、回収熱量に加えてヒートポンプ動力が加わることで余剰熱が発生する。第二蒸留塔ではこの余剰熱を活用するため、リボイラ自体を必要としない。

(2) 熱回収蒸留プロセスの解析に必要なソフトの自社開発

蒸留プロセスにおいて、任意のヒートポンプと熱回収コンデンサの組み合わせにより、全体の必要エネルギーを解析できるシミュレーションプログラムを開発した。これにより、ヒートポンプと蒸留塔の連動性を向上できる。

(3) 蒸留プロセスに適した新開発ヒートポンプの採用

従来のパッケージ型汎用ヒートポンプは、5～30℃の熱源水（チラー水や機器冷却水を想定）から 30～90℃の温水取出しが可能な高圧縮タイプが主流だった。しかし、新開発された「HEM-HR95-GN」は、50～70℃の熱源水から最大 95℃の温水が取り出せる高加熱 COP のヒートポンプで、本装置の温度バランスに適したヒートポンプである。

1) 対象の業種・プロセス

化学・食品・半導体等の企業からの産業排水、地方自治体の下水、畜産からの廃水、等

2) 従来設備との比較及び本装置の優位性

アンモニアを含む排水の従来の処理方法としては、蒸気による放散塔でアンモニアを除去する、エネルギーを大量に消費する方法である。これに対して、本装置は、高加熱 COP のヒートポンプを蒸留設備に効果的に組み込むことで、高い省エネ効果と CO₂ 排出削減効果が得られる。

4. 特許の有無

次のとおり、特許 1 件を取得済み。

特許番号：第 6681964 号 / 名称：アンモニア水溶液の蒸留装置

5. 性能

(1) 一次エネルギー削減性能および CO₂ 排出削減性能

従来のスチームストリッピング式アンモニア回収装置は、ボイラ蒸気による大量のエネルギーで加熱しアンモニアを濃縮・回収していた。本装置では、ボイラ蒸気の代わりにヒートポンプを適用することにより省エネルギーでアンモニアを濃縮・回収することが可能となった。そのヒートポンプを適用するにあたっては、既に「3. 独創性」で記述したが、熱回収コンデンサの追加、第二蒸留塔の設置のプロセスフローの改善を行った。

従来のスチームストリッピング式アンモニア回収装置と本装置の省エネ型ヒートポンプ式との性能比較ということで、供給液アンモニア濃度 1wt%、処理排水アンモニア濃度 10ppm 以下の場合のエネルギー使用量の比較を行い、図表 5 にまとめた。

アンモニア水の処理量 3.5~35.0t/h の間で、それぞれの原油換算の一次エネルギー使用量を比較し、スチームストリッピング式に比べてヒートポンプ式は、一次エネルギー削減率が 81% を超えており、省エネルギー性が非常に大きい装置であることが分かる。

図表 5 一次エネルギー削減率

型式	ヒートポンプ基数	最大処理量 t/h	ヒートポンプ式			スチームストリッピング式			一次エネルギー削減量 (原油換算) KL/年	一次エネルギー削減率 %
			設備動力 kW	一次エネルギー使用量 GJ/年	原油換算 KL/年	蒸気量 kg/h	一次エネルギー使用量 GJ/年	原油換算 KL/年		
HAR-1	1	3.5	54.3	3,753	97	840	20,230	522	425	81.4
HAR-2	2	7.0	108.6	7,506	194	1,680	40,460	1,044	850	81.4
HAR-3	3	10.5	162.9	11,260	290	2,520	60,690	1,566	1,275	81.4
HAR-4	4	14.0	217.2	15,013	387	3,360	80,920	2,088	1,700	81.4
HAR-5	5	17.5	271.5	18,766	484	4,200	101,150	2,610	2,125	81.4
HAR-6	6	21.0	325.8	22,519	581	5,040	121,380	3,132	2,551	81.4
HAR-7	7	24.5	380.1	26,273	678	5,880	141,610	3,654	2,976	81.4
HAR-8	8	28.0	434.4	30,026	775	6,720	161,840	4,175	3,401	81.4
HAR-9	9	31.5	488.7	33,779	871	7,560	182,070	4,697	3,826	81.4
HAR-10	10	35.0	543	37,532	968	8,400	202,300	5,219	4,251	81.4

また、上記と同様に、供給液アンモニア濃度 1wt%、処理排水アンモニア濃度 10ppm 以下の場合の CO₂ 排出量の比較を行い、図表 6 にまとめた。

アンモニア水の処理量 3.5~35.0t/h の間で、CO₂ 排出量を比較し、スチームストリッピング式に比べてヒートポンプ式は、CO₂ 排出削減率が 83%を超えており、脱炭素に大きな貢献ができる装置となっている。

(2) 耐久性・安全性

本装置は、負圧運転であり、圧力容器はなく漏洩に対する危険性も低い。

また、ヒートポンプは、熱源水と加熱水の水を媒介としており、プロセス流体のアンモニアと接することがないため、プロセス流体に対する危険性はない。

また、スチームストリッピング式は、100℃を超える蒸気で加熱するのに対して、ヒートポンプ式は、95℃以下の温水で加熱するので、温度に対する危険性も低くなっている。

(3) 運転・操作性

本装置は、シーケンサーを用いた自動運転が可能であり、また、上位システムと連携することにより、プラント全体の安定操業が可能となる。

図表 6 CO₂ 排出削減率

型式	ヒートポンプ基数	最大処理量 t/hr	ヒートポンプ式		スチームストリッピング式		CO ₂ 排出削減率 %
			設備動力 kW	動力による CO ₂ 排出量 t-CO ₂ /年	従来法の 蒸気使用量 t/h	蒸気による CO ₂ 排出量 t-CO ₂ /年	
HAR-1	1	3.5	54.3	183	0.84	1,131	83.8%
HAR-2	2	7.0	108.6	367	1.68	2,262	83.8%
HAR-3	3	10.5	162.9	550	2.52	3,392	83.8%
HAR-4	4	14.0	217.2	733	3.36	4,523	83.8%
HAR-5	5	17.5	271.5	917	4.20	5,654	83.8%
HAR-6	6	21.0	325.8	1100	5.04	6,785	83.8%
HAR-7	7	24.5	380.1	1283	5.88	7,916	83.8%
HAR-8	8	28.0	434.4	1467	6.72	9,046	83.8%
HAR-9	9	31.5	488.7	1650	7.56	10,177	83.8%
HAR-10	10	35.0	543.0	1833	8.40	11,308	83.8%

※備考：供給液アンモニア濃度：1wt%、処理排水アンモニア濃度：10ppm 以下

【換算値、係数】

一次エネルギー換算値 産業用蒸気=1.17(GJ/GJ)

一次エネルギー換算値 電気(全日買電) = 8.64×10⁻³(GJ/kwh)

蒸気のエネルギー換算値 = 2.573(GJ/ton)

原油換算係数 = 0.0258(KL/GJ)

年間運転時間 = 8,000(h/年)

令和 5 年度実績 電気事業者別排出係数 代替値 = 0.000422(t-CO₂/kWh)

産業用蒸気の CO₂ 排出係数 = 0.0654(t-CO₂/GJ)

また、2019年に実施した実証試験において、供給液の供給量、濃度、温度の変動に対して、ヒートポンプの追随性が非常に良いことがわかった。

さらに、ヒートポンプのターンダウンが約40%まで可能であり、運転範囲が大きく、運転安定性に富んでいる。

(4) 維持管理性

本装置に使用されるポンプ及びヒートポンプは標準品である。したがって、ポンプはシール部品やモーターなどの標準的な保守で充分である。

また、ヒートポンプについては、標準的には、1年毎に定期点検を行い、凝縮器・蒸発器の洗浄、計装品の更新（整備・更新頻度目安：4年毎）及び圧縮機の軸受け・シール部品の更新、膨張弁の部品交換・整備（整備・更新頻度目安：6年または3万時間）を実施することにより、長期間の安定運転が可能である。

6. 経済性

1wt%アンモニアから25wt%アンモニアを回収処理した例で、ランニングコストメリットを算出した。図表7のとおり、ランニングコストが大幅に削減でき、最大処理量が35t/hの場合では、年間約4億5千万円のメリットとなる。

したがって、省エネ型ヒートポンプ式蒸留回収装置が、今後の循環型社会に向けて大きく貢献できると考えられる。

図表7 ランニングコストメリット

型式	ヒートポンプ基数	最大処理量 t/hr	ヒートポンプ式		スチームストリッピング式		ランニングコストメリット 百万円/年
			設備動力 kW	ヒートポンプによる ランニングコスト 百万円/年	従来法の 蒸気使用量 t/h	蒸気による ランニングコスト 百万円/年	
HAR-1	1	3.5	54.3	9	0.84	54	45
HAR-2	2	7.0	108.6	17	1.68	108	90
HAR-3	3	10.5	162.9	26	2.52	161	135
HAR-4	4	14.0	217.2	35	3.36	215	180
HAR-5	5	17.5	271.5	43	4.20	269	225
HAR-6	6	21.0	325.8	52	5.04	323	270
HAR-7	7	24.5	380.1	61	5.88	376	316
HAR-8	8	28.0	434.4	70	6.72	430	361
HAR-9	9	31.5	488.7	78	7.56	484	406
HAR-10	10	35.0	543.0	87	8.40	538	451

※備考：供給液アンモニア濃度：1wt%、処理排水アンモニア濃度：10ppm以下

【換算値、係数】

年間運転時間 = 8,000(h/年)

蒸気単価 = 8,000(円/t)

電気単価 = 20(円/kWh)

7. 将来性

現在、アンモニアは基礎化学品として大量に消費されている一方、特に排ガスの脱硝工程、半導体関連産業、化学繊維産業等から排出される排水には低濃度のアンモニアが含まれており、その総排出量は膨大である。現在、我が国では年間約 80 万トン（資源エネルギー庁、2019 年）、世界ではその 180 倍の約 1 億 5000 万トン（米国地質調査所、2023 年）のアンモニアが製造されており、世界の生産量は増加の一途を辿っている。

国内では、年々、環境基準・排水基準が厳しくなり、また 2050 年温暖化ガス排出実質ゼロの政府方針が出され、今後、その基準・方針に合致した本装置が広く普及していくものとする。以下、今後の見通しを示す。

- (1) アンモニアを含んだ排水を燃焼・希釈等の非効率な方法で放出している装置は、高効率で CO₂ の発生しない本省エネ型ヒートポンプ式蒸留回収装置に置き換えられていくであろう。
- (2) 回収・濃縮されたアンモニアについては、今後、CO₂ を発生しない燃料として、また水素キャリアとして役割を担っていくであろう。
- (3) 化学・食品・半導体等の製造会社だけでなく、エンジニアリング会社・商社へも本装置の理解を深めてもらうことで、普及が拡大していくであろう。
- (4) ヒートポンプについては、さらなる高 COP 化、大型化、防爆化、低価格化が追求されるであろう。