微燃性冷媒を使用した
低温機器のリスク評価報告書

平成 29 年 11 月

一般社団法人　日本冷凍空調工業会

免責事項

本報告書は，最新の技術情報に基づき万全を期して作成しておりますが，掲載された情報の正確性を保証するものではありません．また，本報告書に掲載された情報・資料を利用，使用する等の行為に関連して生じたいかなる損害についても，当工業会並びに著者は何ら責任を負いません．

著作権

本報告書の著作権は当工業会並びに著者が有しています．許可なく全体あるいは一部の転載，複製はお断りします．

微燃性冷媒を使用した低温機器のリスク評価報告書　目次

1.　はじめに 5
2.　リスクアセスメント実施の前提 5
2.1　低温機器の特徴と課題 6
2.2　リスクアセスメント手順 6
2.3　対象機器 8
2.4　許容レベルの設定 9
2.5　ヒューマンエラー 9
2.6　検知警報器の設定値 11
2.7　冷媒漏えい発生確率 11
3.　冷媒漏えい解析 12
3.1　多段形オープンショーケース 14
3.2　リーチインショーケース 26
3.3　平形ショーケース 28
3.4　安全遮断弁の冷媒漏れ量 35
3.5　各ショーケースの冷媒漏れ高さと許容冷媒封入量 42
4.　着火源の存在確率 44
5.　ショーケースのリスクアセスメント結果と安全対策 48
5.1　据付ステージ 48
5.2　使用ステージ 49
5.3　修理ステージ 50
5.4　廃棄ステージ 52
6.　コンデンシングユニットのリスクアセスメント結果と安全対策 54
6.1　据付ステージ 54
6.2　使用ステージ 55
6.3　修理ステージ 58
6.4　廃棄ステージ 59
7.　国内規制改革の経緯 61

7.1　はじめに 61
7.2　高圧ガス保安法の体系及び従来の高圧ガス保安法での冷媒の区分 62
7.3　高圧ガス保安法の改正内容 63
8.　まとめ 68
参考資料 1　安全遮断弁の漏れ量検討詳細 69
参考資料 2　冷凍冷蔵ユニットの安全確保について 87
参考資料 3　コンデンシングユニットの微燃性（A2L）冷媒適用範囲 90

1. はじめに

スーパーマーケットやコンビニエンスストア等に設置される低温機器には，主に R404A や R410A 等の HFC 冷媒が用いられている．HFC 冷媒は地球温暖化係数（以下，GWP）が高く，地球温暖化への影響が懸念されている．そのため，GWP の低い R32，R1234yf と R1234ze(E)が注目されている．これらの冷媒は微かな燃焼性があり，微燃性冷媒と呼ばれている．微燃性冷媒を使用するには，リスクアセスメント（以下，RA）を実施し，冷媒漏えい時の着火リスクを排除することが必要である．

一般社団法人日本冷凍空調工業会（以下，工業会）では，微燃性冷媒を低温機器に用いた場合の火災・火傷事故の発生に関する RA を 2014 年度から専門技術者らによって実施した．本稿ではその結果を報告する．本 RA での対象機器は小規模小売店舗（以下，小形店舗）に納入される別置形オープンショーケース（多段形，セミ多段形），リーチインショーケース，ウォークインショーケース，平形ショーケース及びコンデンシングユニットである．

なお，ISO 5149 : 2014 に準拠すると R32 においてはシステムへの冷媒充填量上限が約 60kg となり，それ以上の A2L 冷媒はシステムに封入できない．又，高圧ガス保安法冷凍保安規則による 20 冷凍トンを超える製品は冷凍保安規則に基づき運用することとなる．このため冷媒量が 60kg を超える製品又は 20 冷凍トンを超える製品は本 RA の対象外とした．ただし，規格及びガイドラインに準拠した濃度管理を行えば，冷媒量が少し増えても店内の着火に関する安全上の問題はない．また，プレハブ冷凍冷蔵倉庫や築造形冷凍冷蔵倉庫については，使用用途が多岐に渡り，着火源の整理に時間を要すること，かつ庫内は密閉空間となるため，冷媒が漏えいした際に可燃域が生成されやすく，検討の結果，微燃性冷媒の使用は困難という結論になり，今回の検討の対象外とした．

上記理由により，RA を小形店舗に限定して実施した．なお，RA 対象となる小形店舗はコンデンシングユニット全体の 20％程度となる．

2. リスクアセスメント実施の前提

本RAの対象である微燃性を有する冷媒を使用する低温機器について，その構造・構成，用途は，不燃性冷媒を使用した従来機器と同じであり，従来実施してきた不燃冷媒の漏えいにより生じる事故に対するRA・安全設計の考察[2-1)2-2)]は，本RAにおいても有効といえる．

これらRAでは冷媒漏えい確率の算出方法にFTAが用いられているが，低温機器の冷媒漏えい事故は，構造・用途が同一である不燃冷媒を使用した機器の漏えい事故が参照できる．従って，本RAでは機器製造メーカが保有する事故データに基づいた冷媒漏えい確率を用いた．

微燃性冷媒であるR32，R1234yfとR1234ze(E)は，従来から知られているR290などの強燃性冷媒と比べて，燃焼下限界や最小着火エネルギーの値が大きい．つまり着火し難く，且つ可燃空間を形成するために，より多くの冷媒を必要とする．そこで，拡散・流動解析手法を用いて，どのような設置環境で，どの程度の可燃領域が形成されるのかを可燃空間の大きさと存在時間を定量化することで評価した．

尚，冷媒の燃焼特性，着火源及び可燃空間解析における取り扱いは，同じくRAを進めてきた店舗用パッケージエアコン，ビル用マルチエアコン，チラーと整合性を持つものとした．

2.1　低温機器の特徴と課題

本RAで扱う低温機器は，小形店舗に使用される冷凍機，別置形ショーケース及びコンデンシングユニットである．これらの製品は機器メーカから出荷される時点では冷媒が製品に封入されておらず，現地でそれぞれの機器を設置した後に冷媒配管を接続し，気密確認を行った後に冷媒を封入するといった特徴がある．従って，輸送・保管時は冷媒漏えいのリスクがなく，機器の据付・試運転からのリスク評価となる．

次に，店舗内に設置されるショーケースの設置形態について示す．ショーケースの形態は，前面もしくは上面が開放されているオープンショーケースと，ショーケースに扉がついており扉を閉めることでショーケース庫内が密閉となるクローズドショーケースとがある．オープンショーケース，クローズドショーケースいずれも，冷媒配管は店舗内床下のピット部を通す場合と，ショーケース上を通す場合の２通りがあり，冷媒配管の接続は一般的にろう付けにて接続される．

店舗においてはショーケースのレイアウト替えが多くあるため，ろう付け機会が多いこと，店舗床下の配管用ピットやリーチインケース等の密閉空間が多いことから，より厳しくRAを実施することを目的に店舗内のろう付け部は漏えい箇所とした．従って低温機器では，ピット部等の配管ろう付け接続部やショーケース上部冷媒配管のろう付け接続部からの漏えい時のリスク評価が必要となる．

また，扉付のクローズドショーケースについては，庫内で漏えいが発生した時に庫内が可燃域に達するリスクがある．その場合，庫内には着火源がないものの，扉を開けた時に店内に可燃域ができる可能性があるため，そのリスク評価も必要となる．

コンデンシングユニットについては，店舗用パッケージエアコン，ビル用マルチエアコンと同じ設置形態となるため，それらのリスク評価結果を基に検討する．

2.2　リスクアセスメント手順

RAは，ISO/IECのGuide 51[2-3)]の反復改善プロセスに基づく**図 2-1**の基本RAフローに従い，下記手順により実施した．なお，今回の評価では，店舗内は「(6)リスク達成の可否判断」にかかわらずリスクの低減策として検知警報器の取り付けを必須とした．これは，調理器や暖房機等の着火源を店舗内に置かれないようコントロールすることが機器メーカでは困難であること，ショーケースで冷却している食品が冷媒漏えいにより冷却不良となることを少しでも回避することが目的である．

(1) 開始

・RAにおける対象製品を用途，容量，構造形式，設置場所から設定する．

・RAの手法を選択する．

・RAにおけるライフステージを設定する．

(2) 使用用途の明確化

・設置環境と用途を設定し，正常・安全である事象，又は異常・危険である事象とは何かを明らかにする．

(3) 危険源の抽出・特定

・危険な事象をもたらすと推定される要因を分析し，危険源として抽出する．

(4) リスクの見積

・各ステージにて，危険源の存在によってもたらされる事象の危害程度とその事象が発生する頻度を見積もる．

(5) リスクの評価

・事象発生頻度と危害の程度より，総合的な事象の重大性を評価する．

(6) リスク達成の可否判断

・事象の重大性が許容できるものであれば，RAを終了する．

・許容できない場合，リスクの低減策を検討した上で，再び(2)～(5)を行う．

(7) リスクの低減

・頻度，程度を軽減する安全対策を立案する．

(8) 安全策の決定

・終了に至る要件を確認し，これを安全策として決定する．

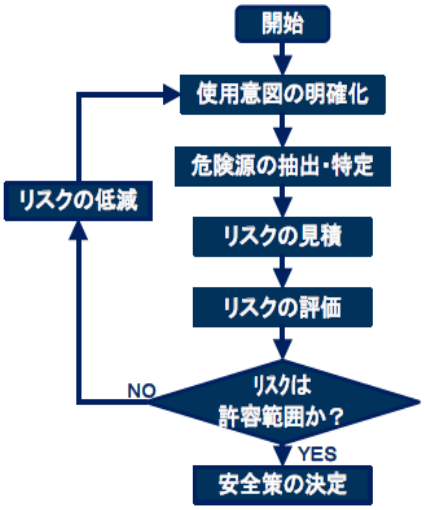


図 2-1 RA の基本フロー

また，本RAは，微燃性を有する冷媒を使用することに関するリスク評価であるため，着目すべきは着火源の存在確率と可燃域形成の要因となる冷媒漏えい事象の存在確率である．ここでは着火源の存在，冷媒漏えい事象とそれらの関係性についてFTA手法を用いて示し，着火源の存在確率，漏えい確率そして漏えい時に生じる可燃空間の発生度合いから火傷や火災事故となる確率を導出することとした．またそれらの事故事象はそれぞれ独立していると考え，確率を合算して1台あたりの年間事故発生頻度として示すこととした．

RAは一般的にFTA，ETA，FMEAなどを使用することが知られている．今回のRAは「着火源の存在」と「可燃域の生成」が同時に存在した場合に発生する事象であり，事象間の独立性が高い点，また発生確率の計算が容易である点からFTAを使用した．またリスク評価については，**図 2-2**に示す安全性の総合判断をするリスクマップ（R-Map）の考え方を参照している．これらの考えは，同時にRAを進めてきた店舗用パッケージエアコン，ビル用マルチエアコン，チラーと基本的に同様である．

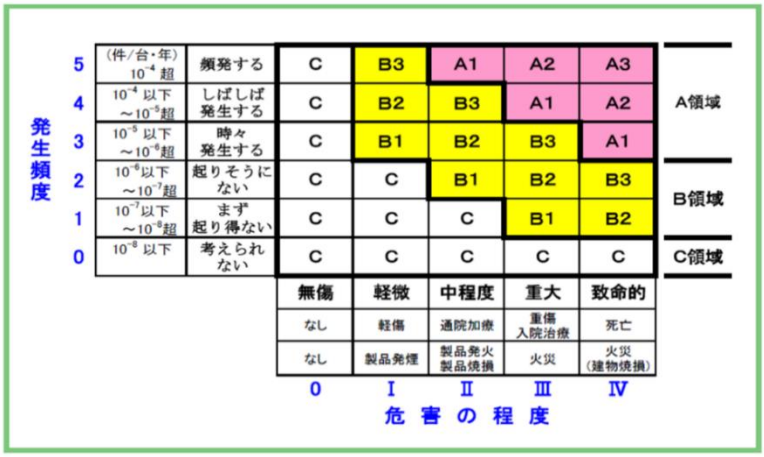


図 2-2 消費生活用品に用いる R-Map

2.3　対象機器

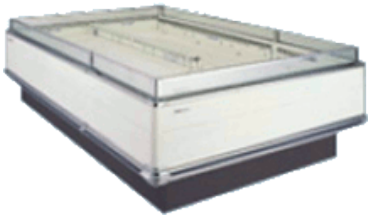
本 RA で扱う機器はショーケース及びコンデンシングユニットである．機器の外観を**図 2-3** 及び**図 2-4** に示す．

多段形オープンショーケース

セミ多段形オープンショーケース

リーチインショーケース（密閉形）

ウォークインショーケース（密閉形）



平形ショーケース

図 2-3　ショーケースの例

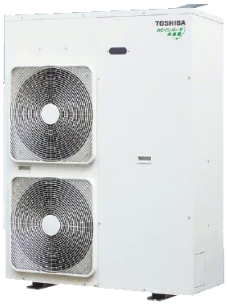


図 2-4　コンデンシングユニットの例

ショーケースの形態は，多段形オープンショーケース，セミ多段形オープンショーケース（高さ 1.5m 未満）といったオープンショーケースと，リーチインショーケース，ウォークインショーケースといったクローズドショーケースに大きく 2 つに分けられる．平形ショーケースは扉付きと扉無しがあり，扉付きの場合は密閉形となる．RA は，形態が異なる多段形オープンショーケース，リーチインショーケース及び平形ショーケースを代表に実施した．また，コンデンシングユニットの RA は，前述のとおり店舗用パッケージエアコン，ビル用マルチエアコンの評価をベースとした．

2.4　許容レベルの設定

ショーケース，コンデンシングユニットともに「据付」，「使用」，「修理」，「廃棄」の 4 つを RA におけるライフステージ（以下，LS）とした．

許容できる事故の発生確率については，100 年に一度重大事故が発生するレベルを許容レベルとした．今回の検討対象は小形店舗となるため，日冷工の 2009 年から 2013 年の出荷統計及び，各メーカのデータから小形店舗納め製品の市場ストックを推計した結果，ショーケースは 49 万台，コンデンシングユニットは 14 万 6 千台となった．本結果から使用時の許容値を設定し，使用時以外は，常に機器を取り扱う作業者が携わっているので，作業者はリスクを制御する立場であることから，事故が起きた際にも自己防御による危害度低減が可能と考え，許容値を 10 倍した（**表 2-1**）．

表 2-1　本 RA におけるリスクの許容レベル

	ショーケース	コンデンシングユニット
使用時	2.0×10^{-8}	6.9×10^{-8}
使用時以外	2.0×10^{-7}	6.9×10^{-7}

2.5　ヒューマンエラー

据付，修理，廃棄の作業ステージにおける冷媒漏えいは，作業者の誤操作でも発生する．ヒューマンエラーの発生確率に関して，2 つの文献の値を**表 2-2**，**表 2-3** に示す．

表 2-2　意識のモードとヒューマンエラー発生率 [2-4)]

フェーズ	意識のモード	生理的状態	エラー発生確率
0	無意識、失神	睡眠	1.0
I	意識ぼけ	疲労、居眠り	0.1以上
II	正常、リラックスした状態	休息時 定例作業時	0.01～0.00001
III	正常、明晰な状態	積極活動時	0.00001以下
IV	興奮状態	慌てている時、パニック時	0.1以上

(出典：橋本那衛，「安全人間工学」，
中央労働災害防止協会，1984)

表 2-3　ヒューマンエラー率 [2-5)]

作業（一定期間にやるべく課せられた）の内容	エラー率（平均値）
まったく不慣れで，もたらされる結果について考える暇なく遂行される仕事.	⓪（0.55）
すぐに行える，あるいは注意をあまり必要としない，かなり簡単な仕事.	㊀①（0.09）
比較的レベルの低い技能で行える，定例的ですぐに終わる仕事をよく訓練された人が行う仕事.	㊀②（0.02）
チェックを行いながら手順書に従って，システムを元の状態あるいは新しい状態に移行させる仕事	㊀③（0.003）
非常によく慣れていて，うまく設計され，よく訓練された定例的な仕事．頻繁に繰り返し行われ，モチベーションの高い，よく訓練された人によって行われる，失敗した場合には修正する時間的余裕がある．しかし，本質的な作業支援はない.	㊀④（0.0004）

低温機器の作業は基本的には教育訓練された技術レベルの高い専門業者が行うが，作業環境は一様ではなく，食品保管に使用されている場合は修理作業に時間的な制約を設けられることも多い．このような状況を考えると，教育訓練された技術レベルの高い専門業者が行う作業とはいえ 10^{-4} を期待するのは難しいと思われ，ヒューマンエラーの発生率は 10^{-3} とした．

一方，ヒューマンエラーの発生率を改善する方法として，**表 2-4 の**打手が紹介されており，これらを行う場合（即ち，教育訓練された場合），1 桁程度の低減が期待できる．そこで，本 RA では適切な教育が実施される場合については，1 桁の低減を盛り込むこととした．

表 2-4　ヒューマンエラーの発生率改善 [2-4)]

発生率改善の打手
■ヒューマンエラーや人間の特性を理解した対策が必要。 ■エラープルーフ化の考え方が必要。 ■未然防止の考え方が必要。 ■3段階によるアプローチが有効。 ■組織的な取り組みが求められる。

2.6　検知警報器の設定値

今回の RA 対象は小形店舗となるが，ショーケースに陳列する青果等の食品から出るエチレンガス等の雑ガスで検知器が誤検知する可能性がある．そこで，食品から発生するガスの調査をおこない以下の雑ガスが発生する可能性があることを確認した．

(1) 成熟に伴うガス
アルコール類，エステル類，テルペンアルコール類
(2) 腐敗に伴うガス
アブラナ科のように硫黄化合物を含む野菜は腐敗時に揮発性の硫黄化合物を生成
(3) 嫌気（無気）呼吸に伴うガス
アセトアルデヒド，エチルアルコール
ブロッコリーは，上記に加えてメタンチオール，ジメチルジスルフィドなどを生成
(4) 産物固有の揮発性物質
ネギ，タマネギ，ラッキョウ，ニンニクなどに含まれる匂い成分であるアリル化合物
カラシ菜類に含まれるアリルイソチオシアネート

しかし，発生する雑ガスの種類は確認できたものの，ガスの濃度を定量的に捕らえることが困難であったため，冷媒漏えい解析により設定値を検討することとした．なお，雑ガスの影響を受けないようにするためには，設定値を可能な限り高くしておく必要があるが，10,000ppm を超えると検知器のセンサー部の感度が悪くなるため，注意が必要である．

詳細は 3 章に示すが，各種ショーケースで冷媒漏えい解析を行った結果，冷媒が漏えいした際に周囲 5m の範囲であれば検知警報器が設置されるショーケースキックプレート付近の濃度が 10,000ppm まで上昇することを確認した．そこで，センサーの検出公差も考慮し，8,000ppm を設定値上限とし，設定値下限は，雑ガスによる誤検知を防止するため 5,000ppm とした．RA 結果詳細については，5 章を参照されたい．

2.7　冷媒漏えい発生確率

製品からの冷媒漏えい確率は，2009 年～2013 年のショーケース及びコンデンシングユニットの全市場ストック台数（**表 2-5**）と，同年の各社のメンテナンスデータを収集・分析した結果から，ショーケース，コンデンシングユニットのそれぞれについて漏えい速度別の漏れ確率を算出した（**表 2-6** 及び**表 2-7**）．なお，市場ストック台数と違い，小形店舗以外も含めた全市場ストック台数としたのは，小形店舗に限定するとメンテナンスデータの母数が減ってしまい，漏えい確率の精度が落ちると判断したためである．漏えい速度については，ビル用マルチと同様に「噴出漏れ 75kg/h」，「急速漏れ 10kg/h」，「微小漏れ 1kg/h」の 3 区分とし，噴出漏れは圧縮機の振動や蒸発器の氷結による配管折損等，急速漏れは配管亀裂等，微小漏れはシール劣化や継ぎ手部の締め付け不良等に起因するものとして集計を行った．

表 2-5　全市場ストック台数

		ショーケース（台）	コンデンシングユニット（台）
平成21年度	2009.4～2010.3	1,306,327	1,637,135
平成22年度	2010.4～2011.3	1,289,664	1,585,575
平成23年度	2011.4～2012.3	1,291,013	1,544,407
平成24年度	2012.4～2013.3	1,310,207	1,500,862
平成25年度	2013.4～2014.3	1,312,687	1,449,364
平均		1,301,980	1,543,469

表 2-6　ショーケースの漏えい速度別漏れ確率

		噴出漏れ	急速漏れ	微小漏れ	合計
平成21年度	2009.4～2010.3	7.51×10^{-6}	5.74×10^{-5}	2.87×10^{-3}	2.94×10^{-3}
平成22年度	2010.4～2011.3	7.01×10^{-6}	7.01×10^{-5}	2.78×10^{-3}	2.85×10^{-3}
平成23年度	2011.4～2012.3	5.12×10^{-5}	1.09×10^{-4}	3.34×10^{-3}	3.50×10^{-3}
平成24年度	2012.4～2013.3	3.74×10^{-5}	8.83×10^{-5}	3.54×10^{-3}	3.67×10^{-3}
平成25年度	2013.4～2014.3	3.32×10^{-6}	1.19×10^{-4}	3.44×10^{-3}	3.56×10^{-3}
平均		2.13×10^{-5}	8.87×10^{-5}	3.20×10^{-3}	3.31×10^{-3}

表 2-7　コンデンシングユニットの漏えい速度別漏れ確率

		噴出漏れ	急速漏れ	微小漏れ	合計
平成21年度	2009.4～2010.3	0.0	9.82×10^{-4}	6.39×10^{-3}	7.37×10^{-3}
平成22年度	2010.4～2011.3	3.22×10^{-5}	1.42×10^{-3}	8.06×10^{-3}	9.51×10^{-3}
平成23年度	2011.4～2012.3	6.61×10^{-5}	9.39×10^{-4}	8.75×10^{-3}	9.75×10^{-3}
平成24年度	2012.4～2013.3	3.39×10^{-5}	1.05×10^{-3}	9.89×10^{-3}	1.10×10^{-2}
平成25年度	2013.4～2014.3	3.50×10^{-5}	1.09×10^{-3}	1.01×10^{-2}	1.12×10^{-2}
平均		3.34×10^{-5}	1.10×10^{-3}	8.63×10^{-3}	9.77×10^{-3}

3.　冷媒漏えい解析

ショーケースから冷媒が漏えいした際の冷媒が空気中に噴出拡散する状況を解析し，燃焼下限界(LFL)～燃焼上限界(UFL)となる可燃空間容積及び持続時間を算出した．この，可燃空間容積及び持続時間を掛け合わせたものを可燃空間時空積と定義し，1 回の冷媒漏えいにおける可燃空間発生度合いとして使用した．計算に使用した冷媒の主要特性を**表 3-1** に，解析条件を**表 3-2** に示す．

表 3-1　冷媒の主要特性

拡散物質	分子量	燃焼速度	最高許容表面温度	拡散係数	可燃領域	
	－	cm/s	℃	m^2/s	LFL（vol%）	UFL（vol%）
R32	52	6.7	700.0	1.4×10^{-5}	14.3	28.9
R1234yf	114	1.5	700.0	9.0×10^{-6}	5.1	14.2
R1234ze(E)	114	1.2	700.0	7.4×10^{-6}	5.3	14.2

(注記) 1.燃焼速度は ISO817 に，LFL は ISO 5149-1 による．

2.最高許容表面温度とは，漏えいした冷媒が高温の金属表面に触れた際に着火・発火に至らない温度をいう．

3.R1234yf 及び R1234ze(E)の LFL 及び UFL は，27℃露点での値.

表 3-2　解析条件

			多段形オープンショーケース	リーチインショーケース	平形ショーケース
使用ソフト			STAR-CCM+Ver.9.06		STAR-CCM+Ver.7.04
解析の種類			陰解法非定常解析		
乱流モデル			標準k－ε		
計算モデル			多成分気体，分離型，非反応，理想気体，非圧縮		
重力		m/s^2	9.81		
ガス定数		J/(kmol K)	8314.4621		
拡散係数（空気-R32）		m^2/s	1.4×10^{-5}		
店内温度		℃	25		27
空気 初期値	密度	kg/m^3	1.18415		1.199
	分子量	kg/kmol	28.9664		28.959
	比熱	J/(kg K)	1003.62		1006.6
	熱伝導率	W/(m K)	0.0260305		0.02623
	粘性係数	Pa s	1.85508×10^{-5}		1.8589×10^{-5}
R32 物性値	密度	kg/m^3	2.156		2.138
	分子量	kg/kmol	52.024		52.024
	比熱	J/(kg K)	847.46		849.83
	熱伝導率	W/(m K)	0.012508		0.012654
	粘性係数	Pa s	1.2607×10^{-5}		1.270×10^{-5}
境界条件	圧力境界	Pa	0		0
壁条件	通常	－	壁面		
	面対称	－	対称面		
メッシュ数		－	庫内漏れエアカーテン有：140 万程度 上記以外：70 万程度		4 台設置時：40 万程度 8 台設置時：120 万程度

(注記) 拡散係数は，以下の計算式から算出した．

$$D_{AB}=\frac{0.0150T^{1.81}}{P(T_{CA}\cdot T_{CB})^{0.1405}\cdot(V_{CA}{}^{0.4}+V_{CB}{}^{0.4})^2}\cdot\sqrt{\frac{1}{M_A}+\frac{1}{M_B}}$$

P: 圧力(atm)

T: 温度(K)

T_{CA},T_{CB}: 臨界温度(K)

V_{CA},V_{CB}: 臨界容積(cm^3/mol)

M_A,M_B: 分子量

拡散係数は圧力，温度によらず一定とし，以下値を使用．

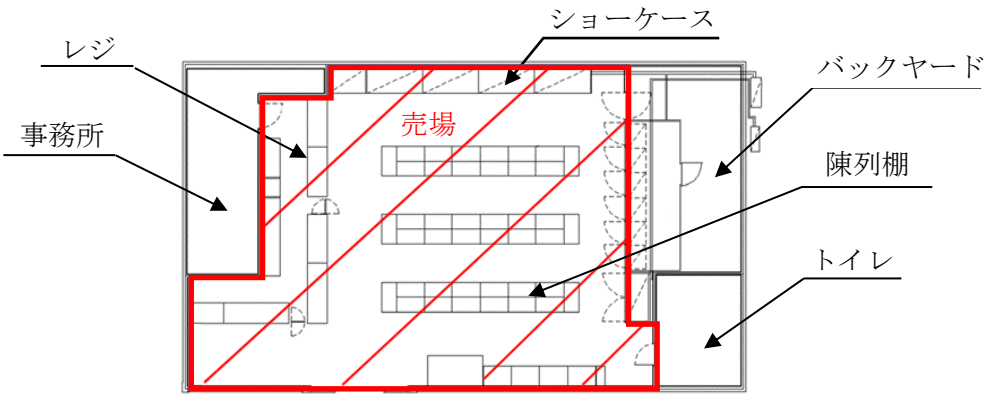
物質	臨界温度(K)	臨界容積(cm^2/mol)
R32	351.26	122.69
Air	132.3	96.53

3.1　多段形オープンショーケース

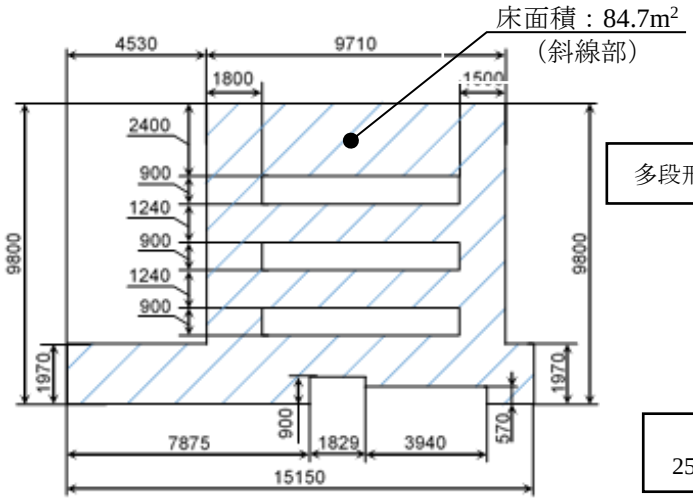
(1) 解析モデル及び解析結果

解析モデルは，小形店舗の平均的な床面積として**図 3-1**に示すモデルを作成した．多段形オープンショーケースで想定される漏えい箇所は，店舗内床下のピット内冷媒配管接続部，ショーケース上を通す上部冷媒配管接続部，ショーケース庫内の蒸発器の3箇所となるが，解析に用いる冷媒量は解析モデル店舗に設置されるコンデンシングユニットの最大冷媒量を考慮して20kgで設定した．なお，冷媒は店舗内の売場（ショーケースが設置されている壁，床，天井で囲われた空間）に漏えいすることになるが，レジ部は腰高程度ではあるが簡易的に区切られていること，陳列棚には商品が置いてあることから漏えい空間として扱わない解析モデル（床面積：84.7m^2）とした．厳密には，これら空間にも冷媒は流れ込むが，解析モデルは安全方向にRAを行うことを目的に，実際の店舗より狭い漏えい空間とした．安全方向の検討になるので，上記考えで問題はないと考える．

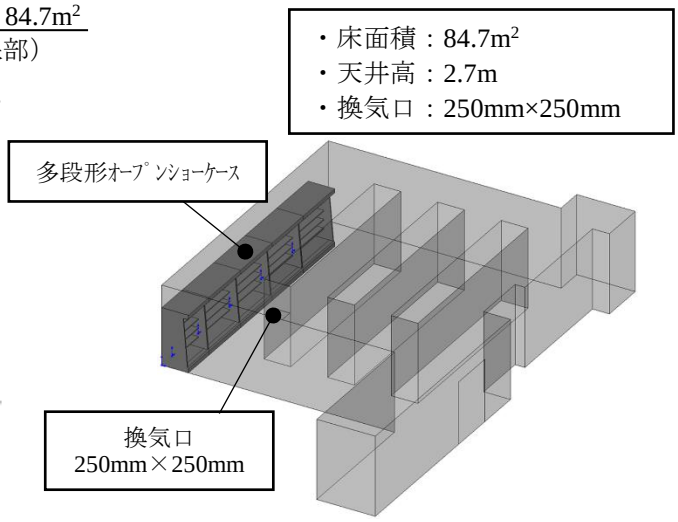
解析を行った際の冷媒漏れ箇所及び解析結果を**図 3-2**及び**表 3-3**に示す．



モデル店舗図



解析モデル（平面図）



解析モデル（立面図）

図 3-1　小形店舗レイアウト

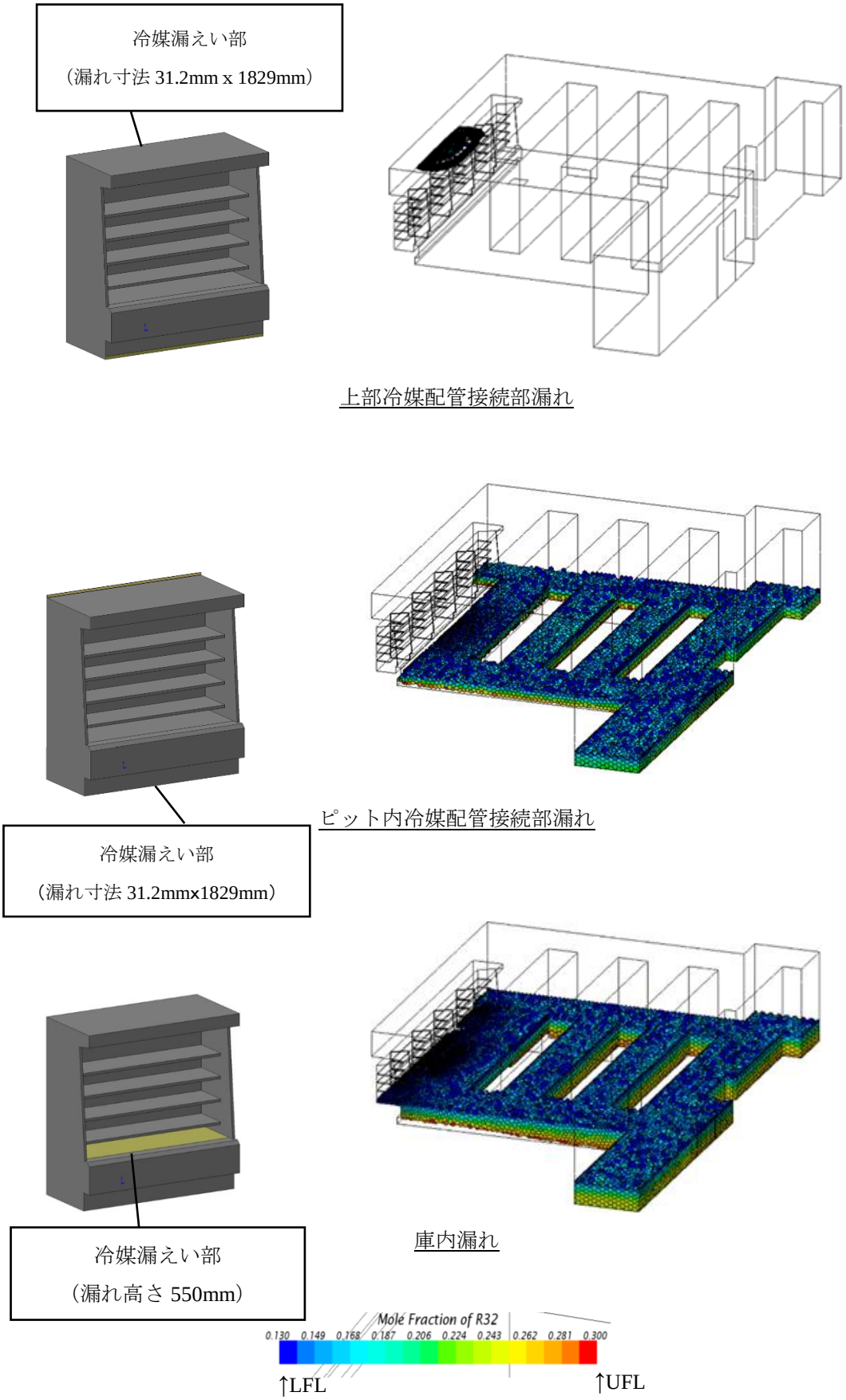


図 3-2　漏れ箇所詳細図及び解析結果

表 3-3　可燃空間時空積　算出結果

漏れ箇所【R32】	床面積	漏えい高さ	自然換気口（幅x高さ）	冷媒量	漏えい速度	可燃空間持続時間	可燃空間時空積
	m^2	m	mm	kg	kg/h	min	m^3・min
上部冷媒配管接続部	84.7	1.94	250x250	20	10	103.6	4.23
ピット内冷媒配管接続部	84.7	0.00	250x250	20	75	31.0	610.2
庫内	84.7	0.55	250x250	20	75	47.3	2103.0

上部冷媒配管は配管接続作業性も良いことから噴出漏れではなく急速漏れとし，それ以外は最悪ケースを想定して噴出漏れで解析を実施した．最悪ケースを想定したのは，先にも述べたようにショーケースのレイアウト替えが多くあり，ろう付け機会が多いこと，店舗床下の配管用ピットやリーチインケース等の密閉空間が多いことから，より厳しく RA を実施するためである．

解析の結果，上部冷媒配管接続部漏れはショーケース天板付近に可燃域が一部生成されるものの可燃空間時空積は小さな値であり，かつ周囲に着火源を設けないことを指導することでリスクを問題ないレベルに低減できると判断した．

ピット内冷媒配管接続部漏れ及び庫内漏れについては，店舗内に広く可燃域が広がり，安全対策の検討が必要となった．ピット内冷媒配管接続部漏れ及び庫内漏れの解析結果から分かるように漏れた冷媒は店舗内の床面付近に停滞する．そこで，ショーケース下部のキックプレートから店舗内空気を吸い込み，ショーケース背面ダクトを経由して店舗内の上部まで漏えいした冷媒を吹き上げる機構をもったサーキュレートファンを取り付け，安全対策とすることを検討した．ピット接続部 75kg/h 漏れ時のサーキュレートファン運転時の漏えい解析結果を**図 3-3** に示す．

なお，キックプレートとはショーケース下部にあるパネルをいい，意匠又は機器装置保護のためのパネルである．通常，キックプレートには大きな開口部はないが，微燃性を有する冷媒を使用する機器においては，店舗内上部に冷媒を吹き上げる必要があるため，開口部が必要となる．

開口部の大きさも漏えい解析で求め，パネル長さに対し $0.0374m^2/m$ 以上の開口部面積を持つパンチング穴又は隙間等を設ければ問題ないことを確認した．キックプレート位置及び開口部の例を**図 3-4** に示す．

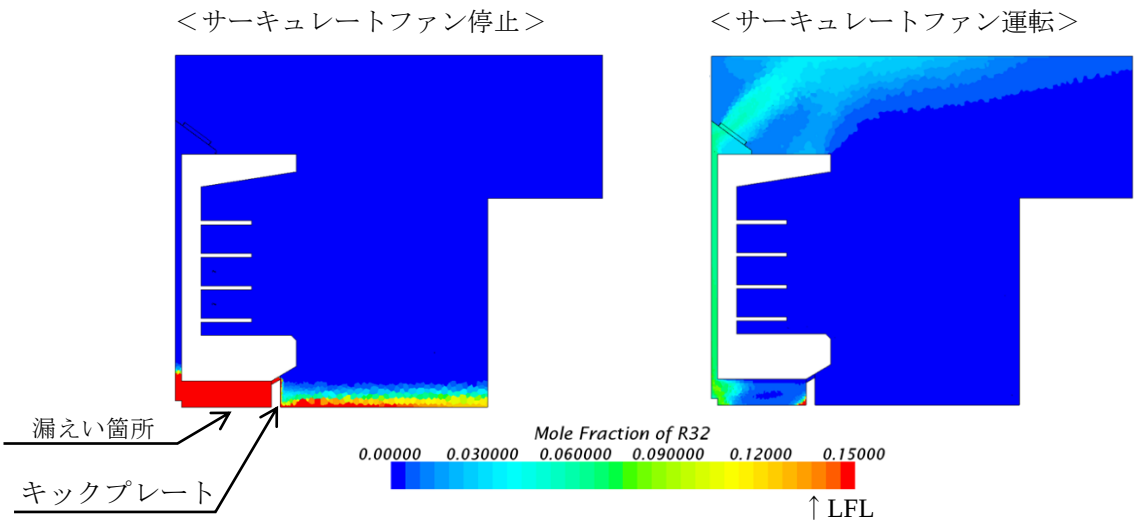


図 3-3　漏れ箇所詳細図及び解析結果(75kg/h 漏れ)

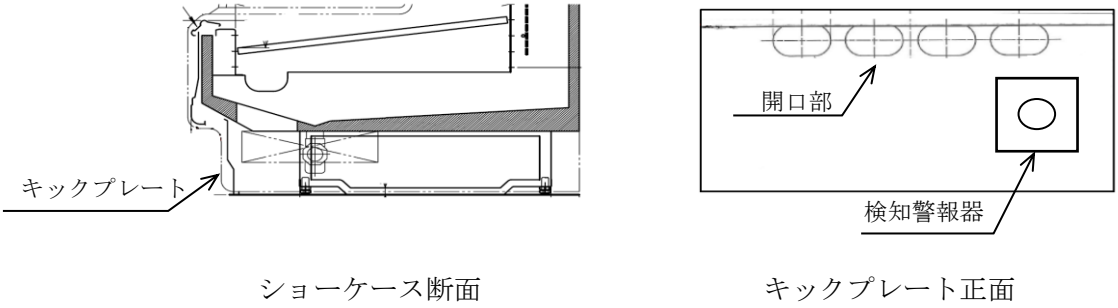


図 3-4　キックプレート位置及び開口部例

サーキュレートファンを運転すると，床面付近に停滞した冷媒が店舗内の上部に吹き上げられることで床面の可燃域が消失し，安全対策として有効に機能していることが確認できる．

なお，サーキュレートファンの風量及び吹出風速については，ビル用マルチ床置機の R32 10kg/h 漏れの解析 [3-1)]をもとに，ベルヌーイの式から得られる式(3.1)より空気と冷媒の混合密度比の影響を考慮し，R32 75kg/h 漏れの風量及び吹出風速を求めた．

$$\frac{1}{2}\rho_{mix}v^2 \propto (\rho_{mix}-\rho_{air})gh \qquad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (3.1)$$

$$\Leftrightarrow h \propto \frac{1}{2g}\frac{\rho_{mix}}{\rho_{mix}-\rho_{air}}v^2$$

ここに，　v　:吹出風速(m/s)

ρ_{mix}　:空気-冷媒混合密度(kg/m^3)

ρ_{air}　:空気密度(kg/m^3)

g　:重力(m^2/s)

h　:吹き上げ高さ(m)

R1234yf についても式(3.1)を使用し，$\frac{\rho_{mix}}{\rho_{mix}-\rho_{air}}$ 項が R32 比 0.6 であることから，R32 と同等以上の吹き上げ高さとするためには吹出風速を 1.3 倍にすればよい．そこで，これらを考慮した条件式(3.2)を導き出した．

$$v \geqq -0.35\times Q + 0.031\times M + 5.65$$
$$v \geqq 2.0 \qquad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (3.2)$$
$$Q \geqq 9.6$$

ここに，　v　:吹出風速(m/s)
　　Q　:風量(m^3/min)
　　M　:使用冷媒の分子量

なお，**図 3-3** は，R32 についての解析結果となるが，R1234yf についても同様の解析を行い，**図 3-5** に示すとおり床面の可燃域が消失することを確認した．ファン風量は，最低風量 9.6 m^3/min の約 75%風量となる 7.3m^3/min と，約 150%風量となる 14.7m^3/min で確認し，いずれも問題ない結果となる．

＜ファン風量：7.3m^3/min＞　　＜ファン風量：14.7m^3/min＞

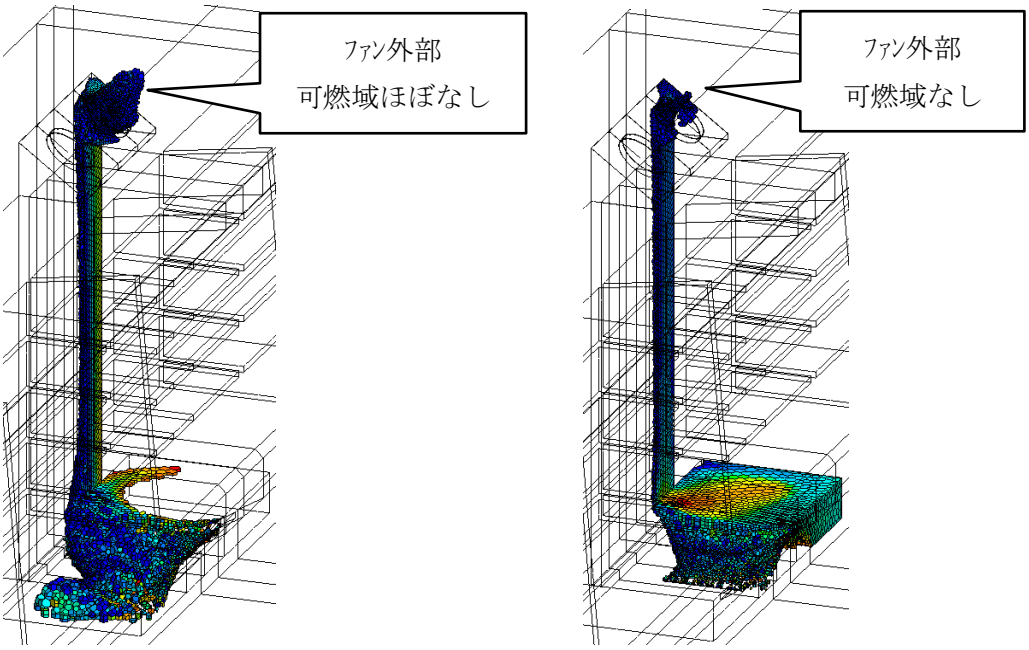


図 3-5　R1243yf **の解析結果**(75kg/h **漏れ**)

サーキュレートファンを常時運転させることは可能ではあるが，運転音や電力量増加が懸念される．そこで，冷媒漏えいを検知した後にサーキュレートファンを運転させる検討を行った．解析結果を**図 3-6** 及び**図 3-7** に示す．解析モデルは幅 5m の距離にショーケースを設置したもので，左端のショーケースのピット内冷媒配管接続部から冷媒が漏れ，右端のショーケース近傍まで漏えいした冷媒が拡散されるかを確認した．解析の結果，右端のショーケース付近まで冷媒が拡散し，10,000ppm 程度まで濃度が上昇することを確認した．従って，漏えい検知器はショーケースキックプレート部にショーケース両端から 5m，更に 10m の間隔で検知器を設置することで安全が確保できる．

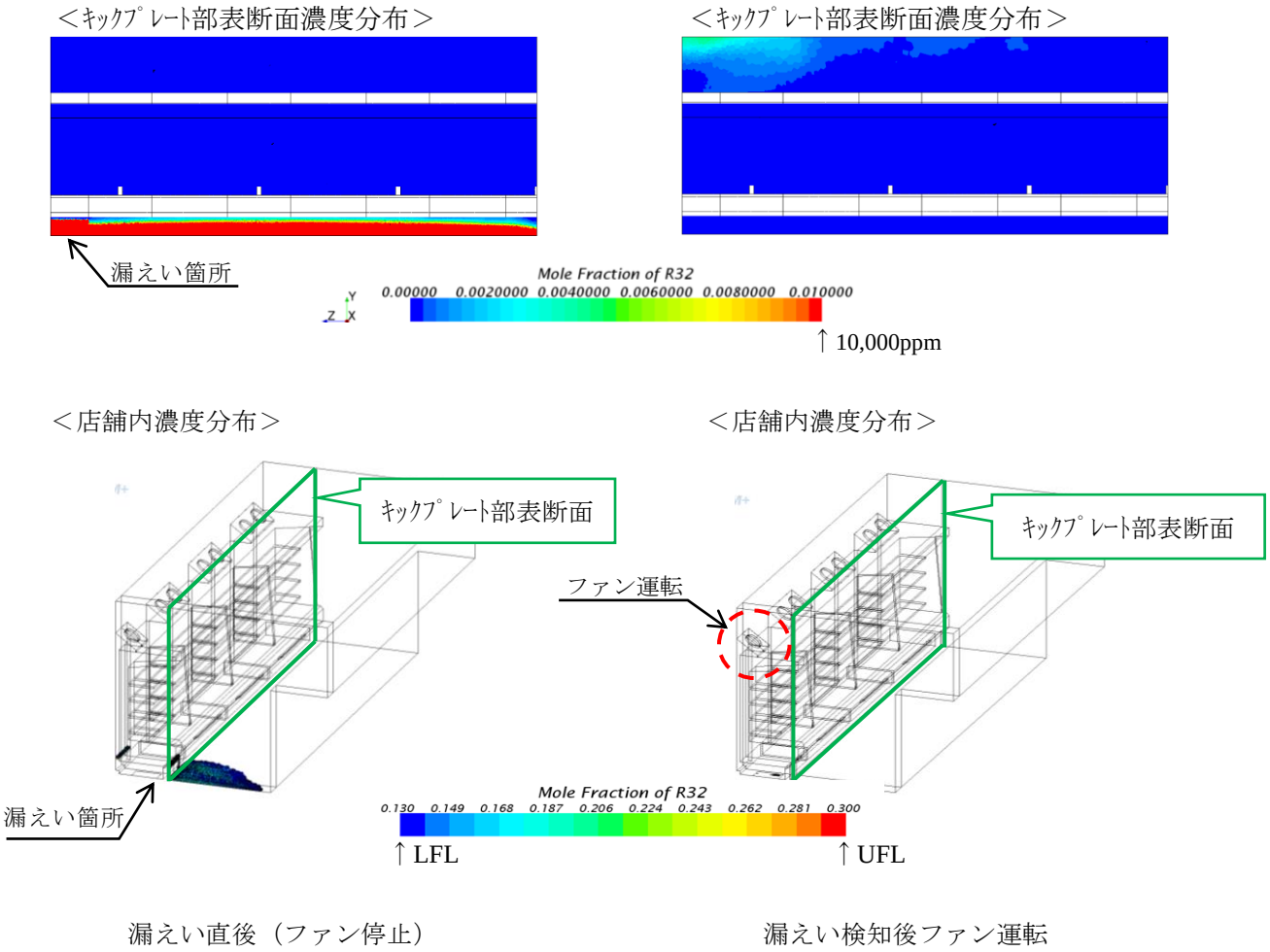


図 3-6　漏れ箇所詳細図及び解析結果(10kg/h **漏れ**)

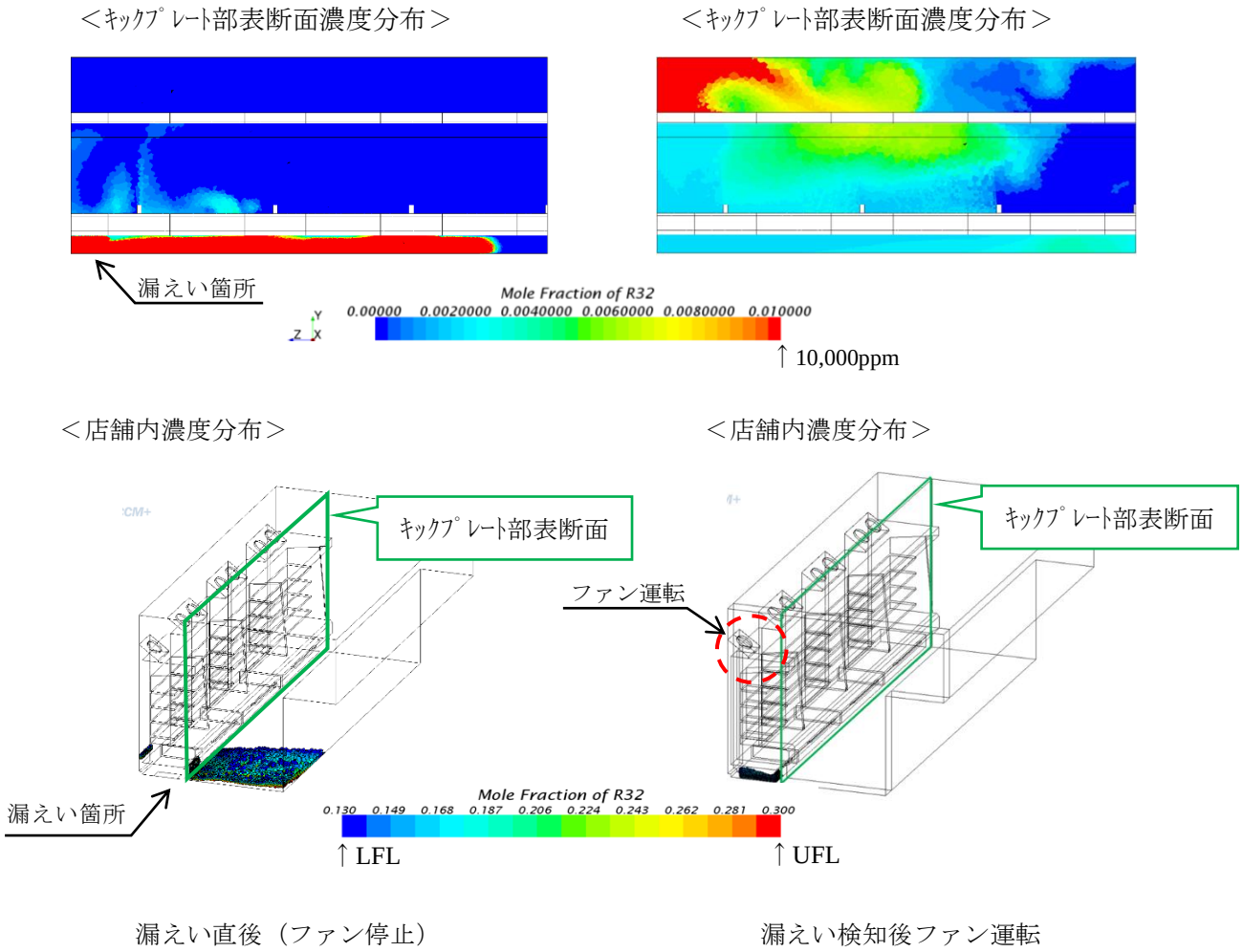


図 3-7　漏れ箇所詳細図及び解析結果(75kg/h **漏れ**)

次に，庫内 75kg/h 漏れの検討を行う．多段形オープンショーケースは通常エアカーテンを備えており，庫内の熱交換器等から冷媒が漏えいした場合も**図 3-8** に示すように店舗内が可燃域となることはない．

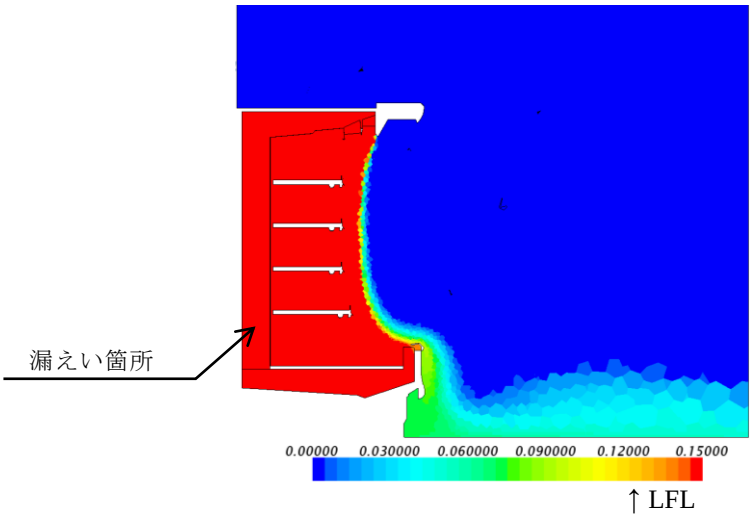


図 3-8　庫内漏れ解析結果(エアカーテン有，75kg/h **漏れ)**

しかし，RA では最悪条件を想定する必要があるため，**図 3-2** では庫内ファンが異常停止し，エアカーテンが形成されない条件での解析を実施した．結果として，店舗内に可燃域が広がる形となったため，最悪条件でもサーキュレートファン運転により安全が確保できるか解析を行った．解析結果を**図 3-9** に示す．サーキュレートファンを運転することで，冷媒が店舗内の上部に吹き上げられることで可燃域が消失し，安全対策として有効に機能していることが確認できた．

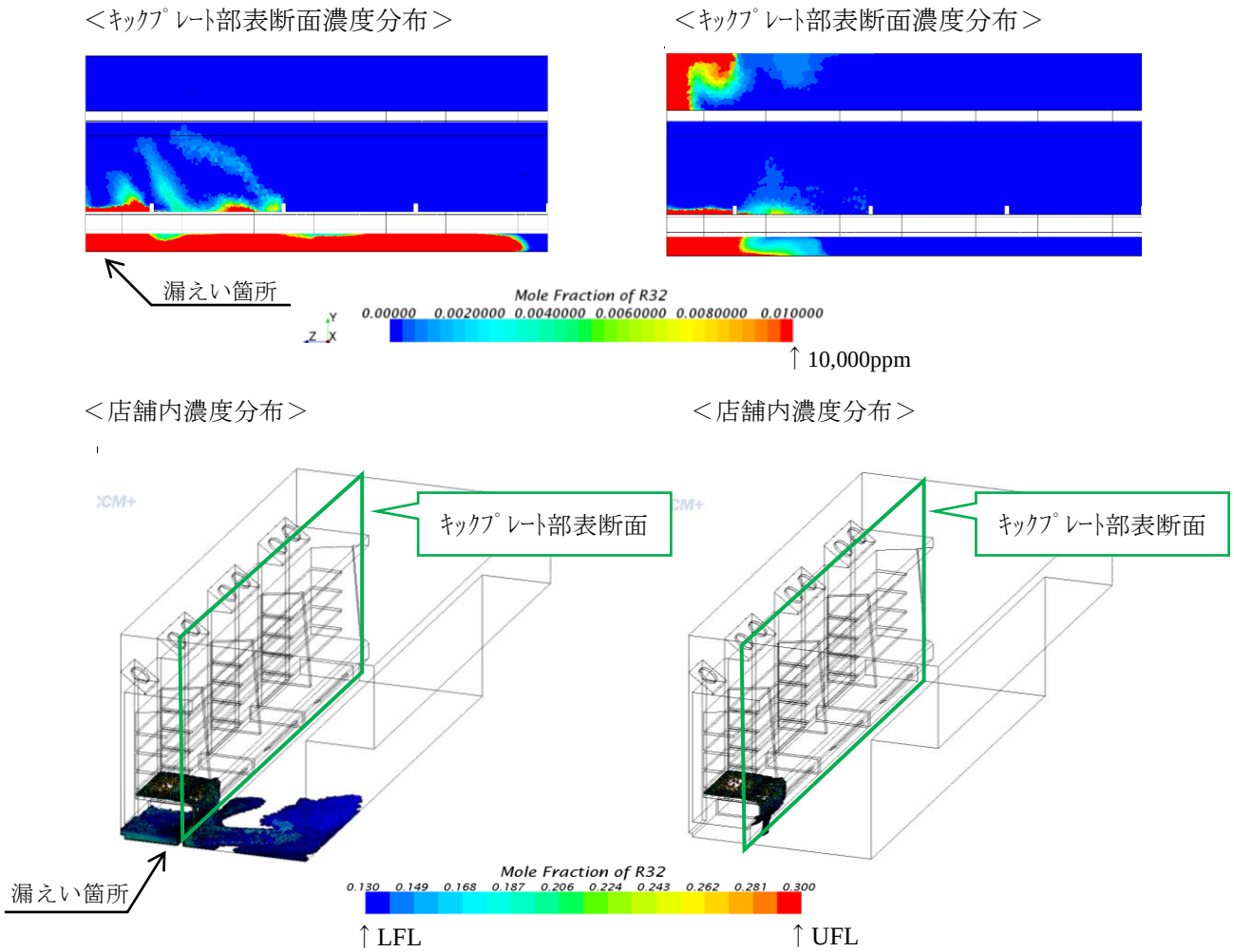


図 3-9　庫内漏れ解析結果(サーキュレートファン運転，75kg/h 漏れ)

以上のことから，サーキュレートファン運転により床面付近の可燃域が消失することは確認できたが，冷媒漏えい検知後にサーキュレートファンを運転させる回路構成とした場合はサーキュレートファンが運転するまでは可燃域ができる可能性がある．そこで，それが許容できる範囲であるかを確認するため，サーキュレートファン運転までの可燃空間時空積を計算した．その結果を**表 3-4** に示す．

漏えい検知後にサーキュレートファン運転の場合，僅かに可燃域が生成される結果とはなったが，サーキュレートファンなしに比べ極端に小さい値となる．一方，本 RA では，サーキュレートファンなしの時の可燃空間時空積を使用し，かつ，サーキュレートファンが故障するリスクを考慮してリスクを許容値以下にできており，僅かにできる可燃空間時空積はまったく問題ないと考える．RA 結果詳細については，5 章を参照されたい．

表 3-4　サーキュレートファン運転までの可燃空間時空積　算出結果

漏れ箇所【R32】	計算モデル	サーキュレートファンなし		サーキュレートファンあり（漏えい検知後運転）	
		可燃空間持続時間	可燃空間時空積	可燃空間持続時間	可燃空間時空積
		min	m^3・min	min	m^3・min
ﾋﾟｯﾄ内冷媒配管接続部	図 3-2 中央	31.0	610.2	0.9	0.0499
庫内	図 3-2 下段	47.3	2103.0	0.67	0.0556

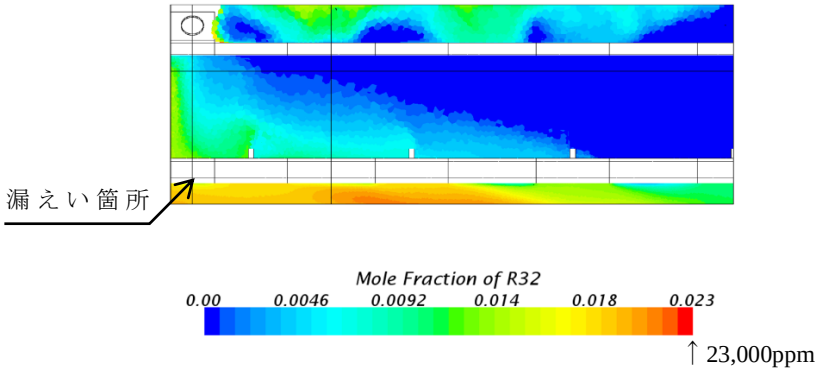
次に，サーキュレートファンの吹き出し角度について検討を行った．前述の解析は，サーキュレートファンの吹き出し方向が水平から 54.3°の解析結果であったが，これに加え 30°（**図 3-10**），60°（**図 3-11**），90°（**図 3-12**）の解析を実施した．

解析の結果，サーキュレートファンのかくはん効果により，いずれの条件においても冷媒濃度は 20,000ppm 程度となり，安全対策として有効に機能していることを確認した．

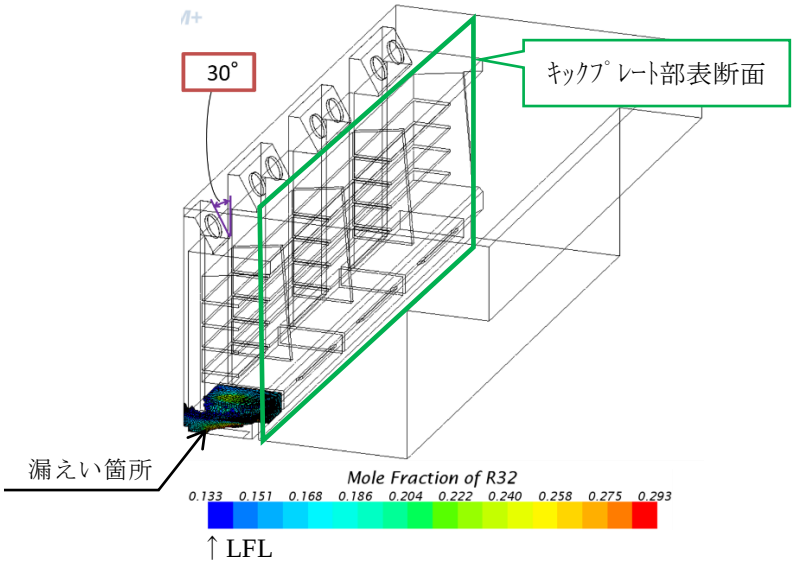
しかし，吹き出し方向が水平から 90°については，垂直方向に吹き出された風が天井にあたり，再びサーキュレートファンに吸い込まれる形となり，安全上は問題ないものの，冷媒漏えいが発生したショーケース近傍の冷媒濃度が比較的高い結果となった．微燃性を有する冷媒を使用する場合，RA によりリスクが許容値以下であるかの確認以外に最大冷媒量の管理が必要となるが，冷媒量管理は，冷媒が冷媒漏えい空間にある程度均一にかくはんされることを前提としている．従って，サーキュレートファンの吹き出し方向は，冷媒がある程度均一にかくはんされる角度とする必要がある．

そこで，漏えいした冷媒が店舗内にかくはんされるようサーキュレートファンの吹き出し方向は 30°～60°とした．

＜ｷｯｸﾌﾟﾚｰﾄ部表断面濃度分布＞



＜店舗内濃度分布＞



＜サーキュレートファン吹き出し空気の流れ＞

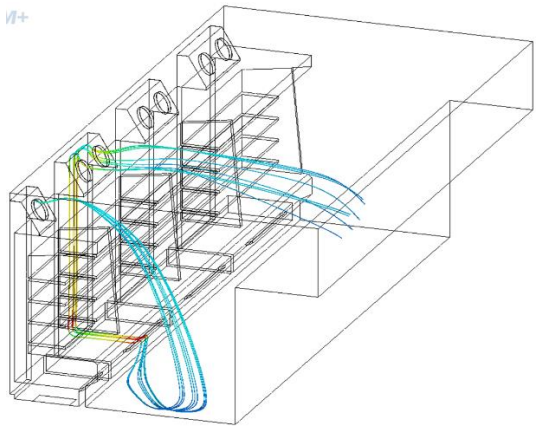
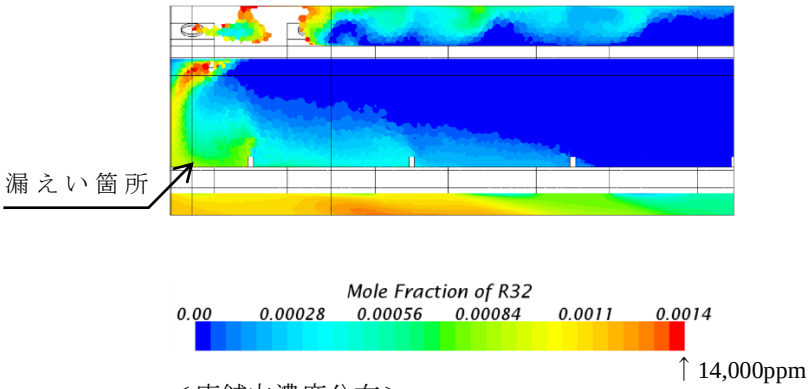
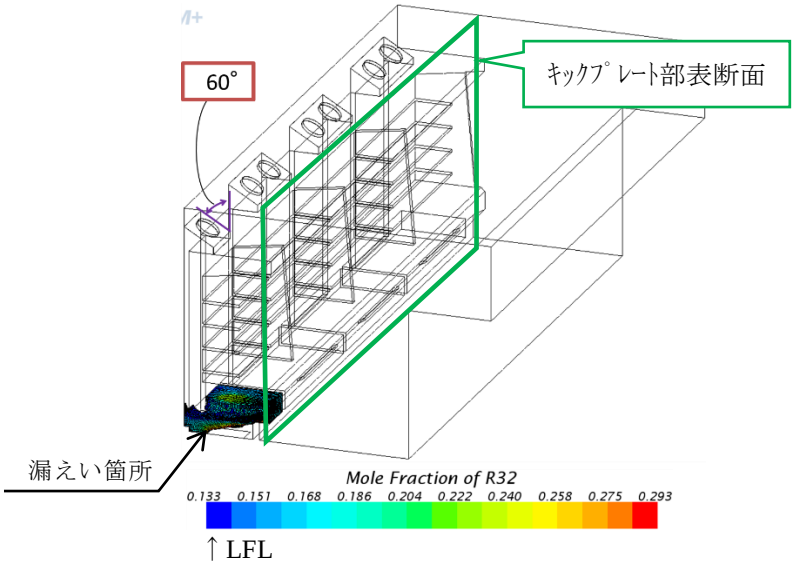


図 3-10　吹き出し方向 30°(75kg/h 漏れ)

＜ｷｯｸﾌﾟﾚｰﾄ部表断面濃度分布＞



＜店舗内濃度分布＞



＜サーキュレートファン吹き出し空気の流れ＞

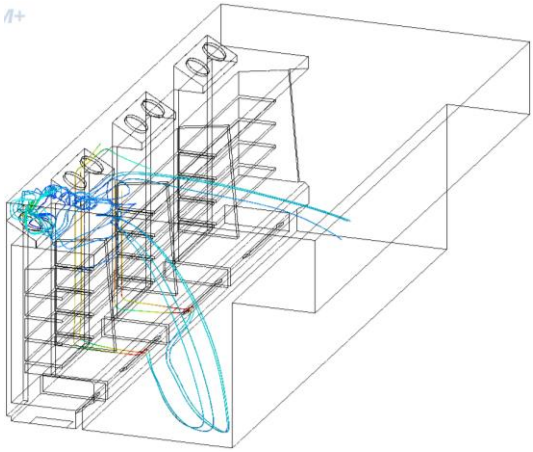
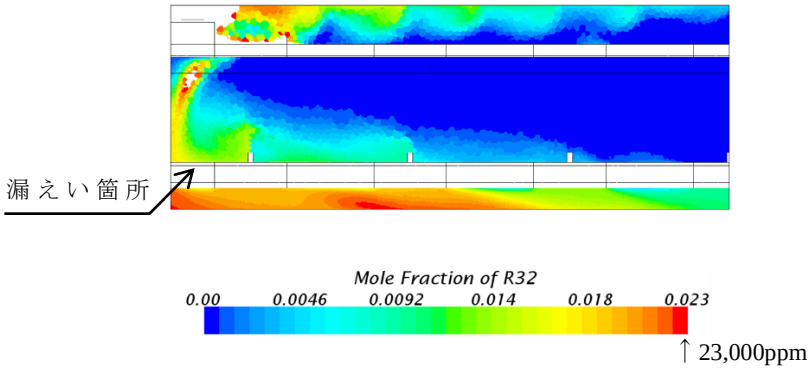
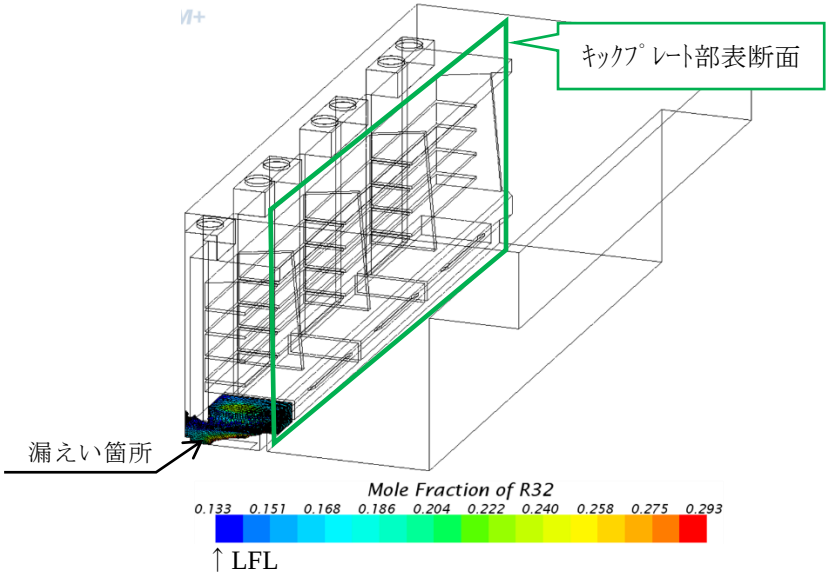


図 3-11　吹き出し方向 60°(75kg/h 漏れ)

＜ｷｯｸﾌﾟﾚｰﾄ部表断面濃度分布＞



＜店舗内濃度分布＞



＜サーキュレートファン吹き出し空気の流れ＞

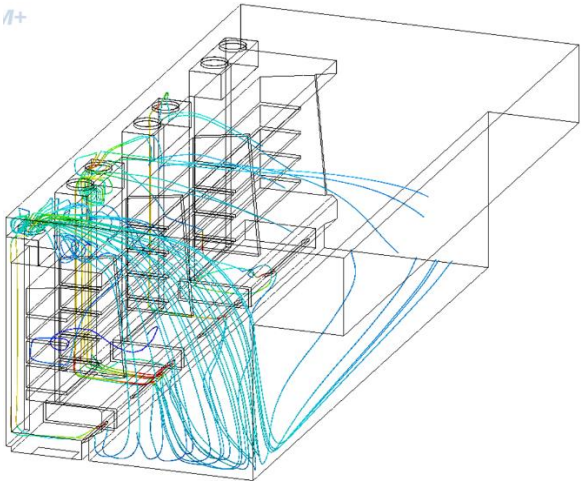


図 3-12　吹き出し方向 90°(75kg/h 漏れ)

3.2　リーチインショーケース

(1) 解析モデル及び解析結果

解析モデルは，多段形オープンショーケースの場合と同一サイズの店舗として**図 3-13**に示すモデルを作成し，冷媒漏えい解析を行った．リーチインショーケースで想定される漏えい箇所は，多段形オープンショーケース同様，店舗内床下のピット内冷媒配管接続部，ショーケース上を通す上部冷媒配管接続部，そしてショーケース庫内の蒸発器の3箇所となるが，配管接続部に関しては，多段形オープンショーケースの評価が代用できるため，ショーケース庫内漏れに対するリスク評価を行った．その際の冷媒漏れ箇所及び解析結果を**図 3-14**，**表 3-5**に示す．なお，解析に用いる冷媒量は多段形オープンショーケース同様，解析モデル店舗に設置されるコンデンシングユニットの最大冷媒量を考慮して20kgで設定した．

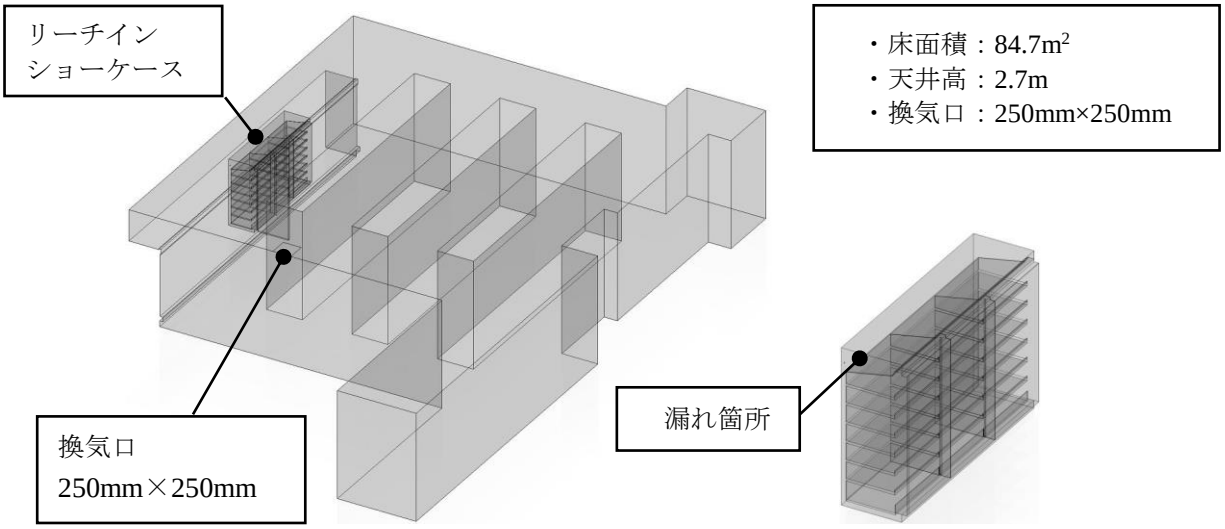
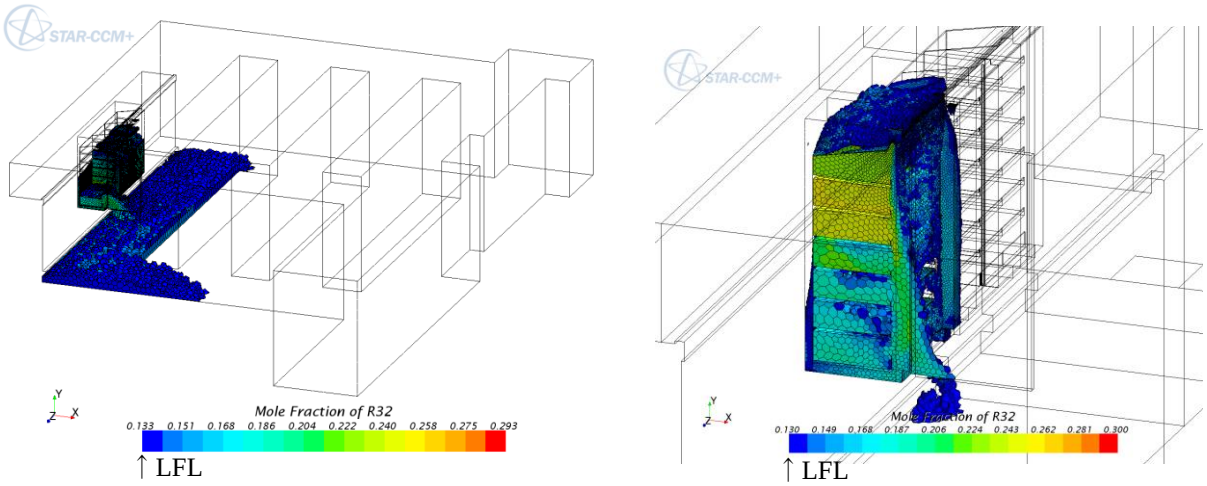


図 3-13　解析モデル



安全対策なし　　安全対策あり（10,000ppm で安全弁閉）

図 3-14　漏れ箇所詳細図及び解析結果(サーキュレートファン運転，75kg/h 漏れ)

表 3-5　可燃空間時空積　算出結果

漏れ箇所【R32】	床面積	自然換気口（幅x高さ）	安全遮断弁	冷媒量	漏えい速度	可燃空間持続時間	可燃空間時空積
	m^2	mm	－	Kg	kg/h	min	m^3・min
庫内	84.7	250x250	無し	20	75	21.2	8.96
庫内	84.7	250x250	付き	20	75	0.07	0.0016

ショーケース庫内漏れは蒸発器の凍結を考慮し，噴出漏れで解析を実施した．

図 3-14 に示す安全対策なし（最悪ケースを想定した安全遮断弁なし，かつ庫内ファン停止）では，冷媒が漏えいすると密閉空間であることから庫内が可燃域に到達する．その状態で扉を開けると店内に可燃域が広がる結果となったため，リスク低減のための安全対策の検討が必要となった．安全対策は，庫内が可燃域に到達しないことを前提に検討した結果，庫内への漏えい検知器の設置，及び液配管に安全遮断弁を装備することで，漏えい検知後に安全遮断弁を閉としてコンデンシングユニットを停止させる回路とした．

これにより**表 3-5** の安全遮断弁付きに示すよう可燃空間時空積を小さくすることでリスクを許容値以下とすることができた．また，**図 3-14** に示す安全対策ありの解析結果でも，安全遮断弁閉により店内にほとんど可燃域ができない状態となり，安全対策として有効に機能していることが確認できた．

なお，小形店舗では，コンデンシングユニット 1 台に対して複数台のショーケースを接続することが一般的であるため，上記回路では冷媒漏えいのないショーケースの冷却も停止することになる．そこで，冷媒漏えいのないショーケースの運転を継続させるための回路を**図 3-15** に示す．

ガス配管，液配管それぞれに安全遮断弁を設置することで，冷媒漏えいのないショーケースの冷却が可能となるが，現地での施工性を考慮し，実運用上は，ガス配管側は逆止弁（双方向の電磁弁も可），液配管側は電磁弁（逆止弁は不可）を設置することとした．

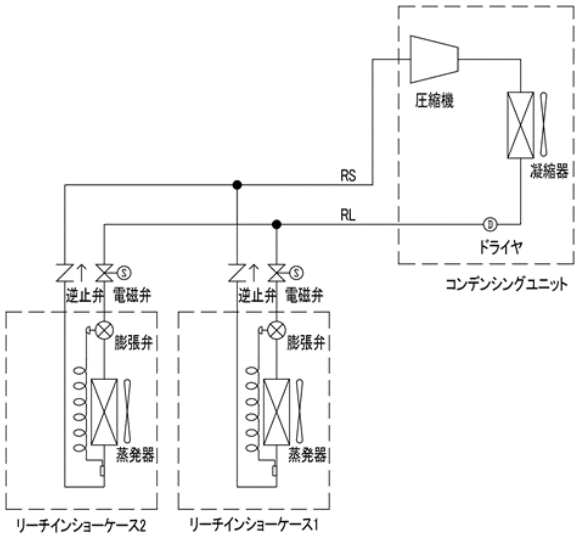


図 3-15　冷媒漏えいのないショーケースを運転継続させるための回路

3.3　平形ショーケース

(1) 未対策時の解析モデル及び解析結果

未対策時の解析モデルとして，平均的な小形店舗の約半分のモデルとして**図 3-16** を作成した．平形ショーケースで想定される漏えい箇所は，多段形オープンショーケース同様，店舗内床下のピット内冷媒配管接続部，ショーケース庫内の蒸発器となる．漏えい個所を**図 3-16** のＡ－Ａ断面に示す．また，上部に扉のないタイプの平形ショーケースにて行った．

リスク評価を行った際の冷媒量，冷媒漏れ箇所及び解析結果については**表 3-6** に示す．

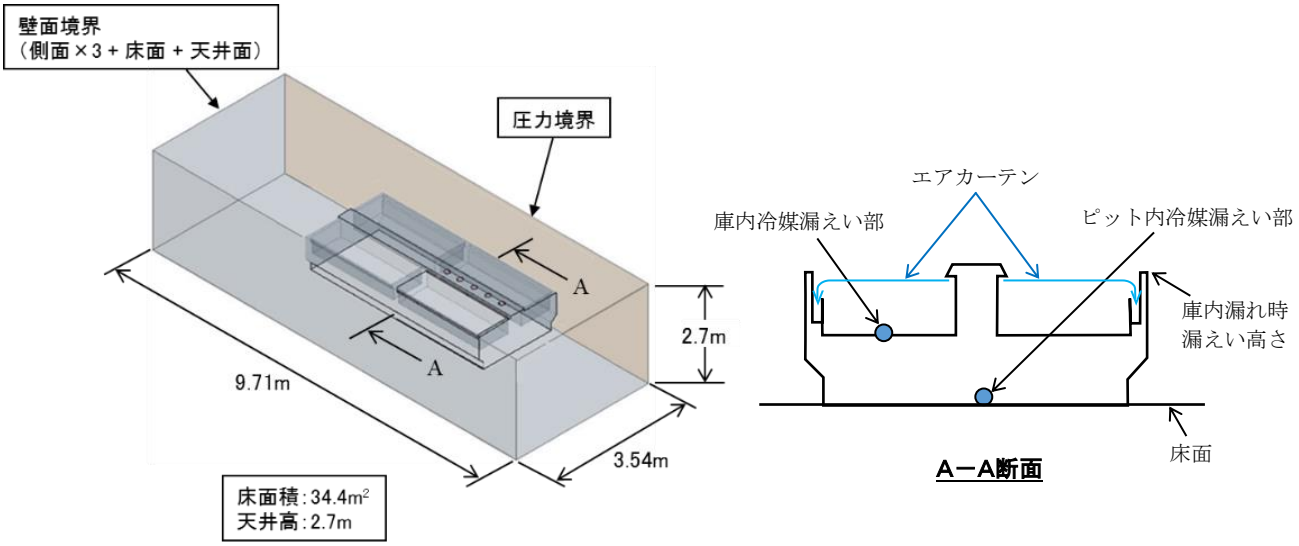


図 3-16　小形店舗レイアウト（未対策時）

表 3-6　可燃空間時空積　解析条件及び算出結果

漏れ箇所【R32】	床面積	漏えい高さ	冷媒量	漏えい速度	可燃空間持続時間	可燃空間時空積
	m^2	mm	kg	kg/h	min	m^3・min
ピット内冷媒配管接続部	34.3	0.0	10	10	60.6	2.85
庫内	34.3	0.85	10	10	0	0
	34.3	0.85	10	75	0	0

表 3-6 に示すように，ピット内冷媒配管接続部漏れについて，床面での可燃域の生成が確認され，安全対策は,多段形オープンショーケース同様，必要となった．一方，庫内漏れでは，平形ショーケースでは，筐体は四方が壁面で囲まれる構造であり，またエアカーテンが施されているため，10kg/h 漏れ，75kg/漏れともに床面での可燃域は生成されなかった．解析結果を**図 3-17** に示す．

＜ピット部漏れ　（10kg/h 漏れ）＞　　＜庫内漏れ　（10kg/h 漏れ）＞　　＜庫内漏れ　（75kg/h 漏れ）＞

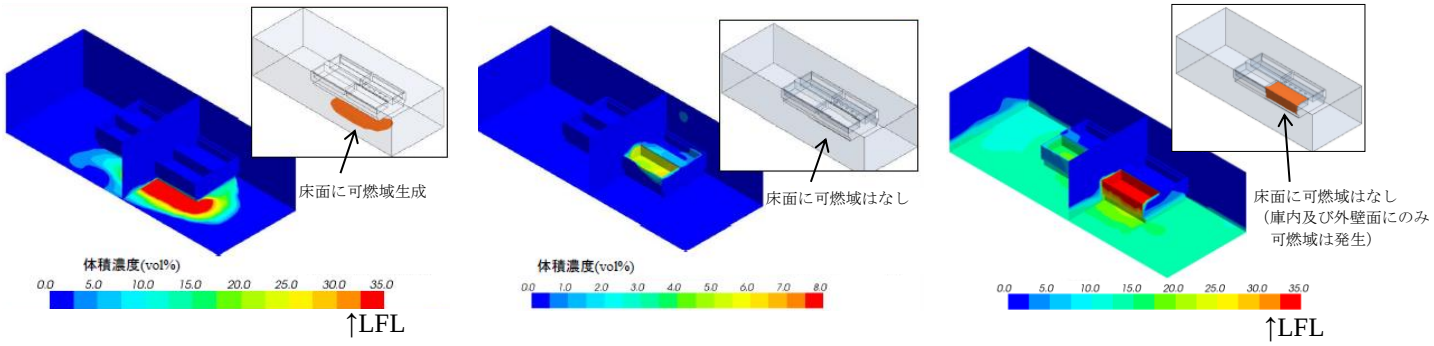


図 3-17　解析結果（未対策時）

(2) 対策時の解析モデル及び解析結果

安全対策については，多段形オープンショーケース同様，ピット内冷媒配管部接続部から漏れ床面付近に滞留した冷媒をショーケース下部に相当する位置から吸込み，店舗内の上部まで漏えいした冷媒を吹き上げる機構を持ったサーキュレートファンを取り付け，安全対策とすることを検討した．ピット内冷媒配管接続部 75 kg/h 漏れ時のサーキュレートファン運転時の解析モデルを平均的な小形店舗のモデルとして**図 3-18** を作成した．解析条件については，**表 3-7** に示す．

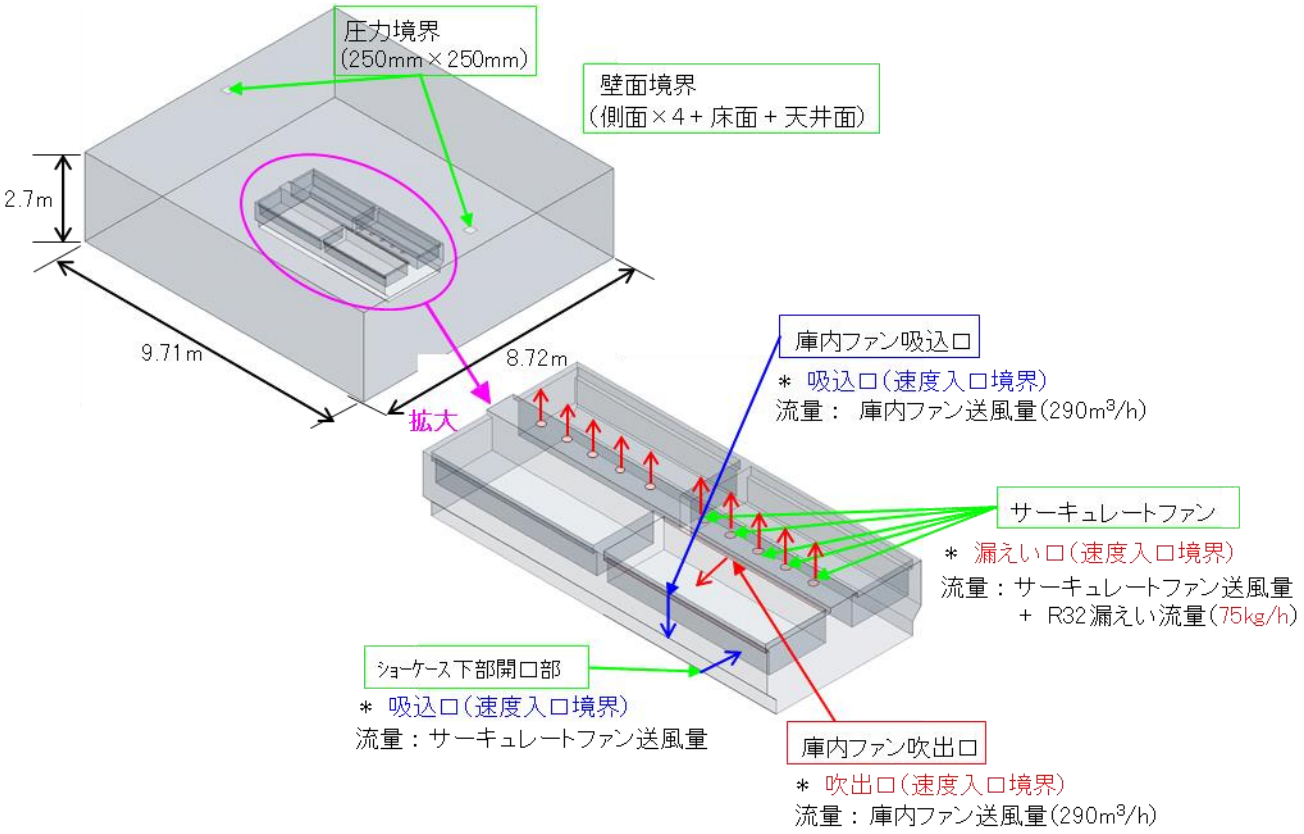


図 3-18　小形店舗レイアウト（対策時）

表 3-7　サーキュレートファン対策時解析条件

漏れ箇所【R32】	床面積	漏えい高さ	冷媒量	漏えい速度	可燃空間持続時間	可燃空間時空積
	m^2	mm	kg	kg/h	min	m^3・min
ﾋﾟｯﾄ内冷媒配管接続部	84.7	0.0	20	75	9.6	3.9
					13.3	2.6

ピット内冷媒配管接続部 75kg/h 漏れ時のサーキュレートファン運転時の漏えい解析結果を**図 3-19** に示す．サーキュレートファンを運転することで，床面付近に滞留していた冷媒が店舗内の上部に吹き上げられることで，可燃域が消失し，安全対策として有効に機能していることが確認できる．

次に，サーキュレートファンの必要風量及び必要風速については，ビル用マルチ床置機での解析結果を元に，床面から 2.7m 吹き上がる風量及び風速の関係を，10 kg/h 漏れと 75 kg/h 漏れの空気と冷媒の混合密度比の影響を考慮し，風速，風量を求め，解析にて十分な吹き上げ高さに到達する事を確認した．R32 での吹き上げ高さの解析結果を**図 3-20** に示す．

なお，R1234yf での必要風速，必要風量は，R32 の約 1.3 倍必要であることがビル用マルチでの解析により報告されており，平形ショーケースにおいてもその値を考慮しつつ，また，R32 と R1234yf の分子量比から，分子量の関数による条件式(3.2)を導いた．風量及び吹出風速の関係を**図 3-21** に示す．

なお，平形ショーケースのかくはん装置の設置高さは 0.85m とした．

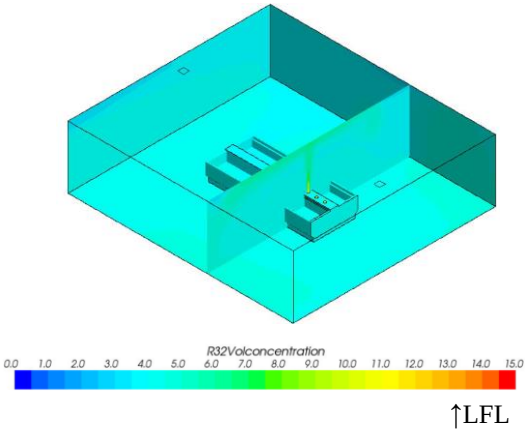


図 3-19　サーキュレートファン運転時の濃度分布

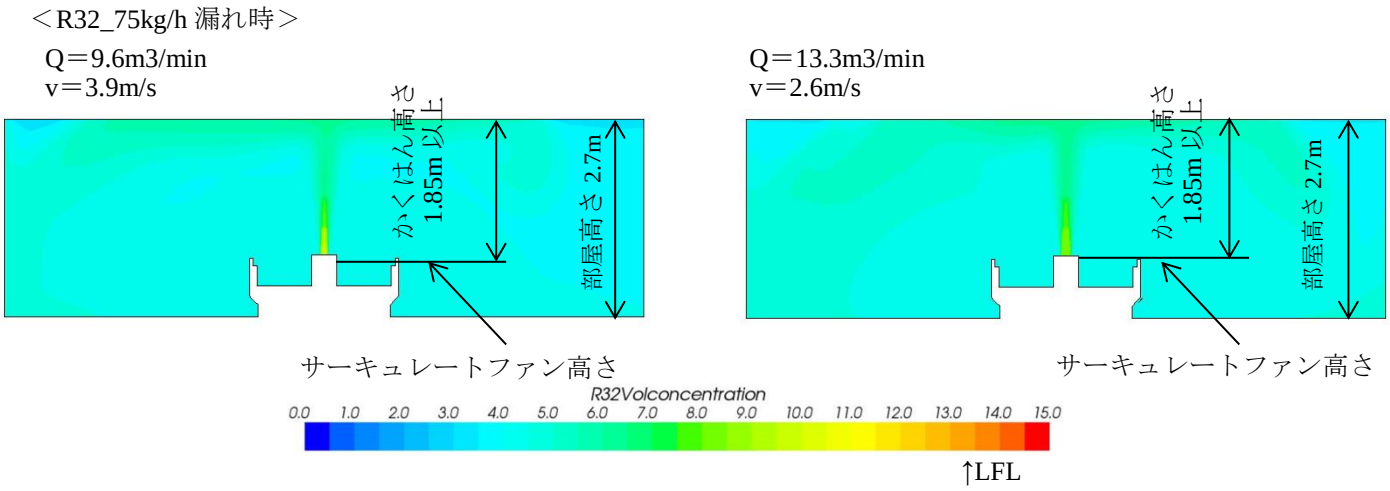


図 3-20　サーキュレートファン鉛直かくはん時の濃度分布と吹き上げ高さ

$v \geqq -0.35 \times Q + 0.031 \times M + 5.65$

$v \geqq 0.0113 \times M + 2.012$ ・・・・・・・・(3.2)

$Q \geqq 9.6$

ここに，　v：吹出風速(m/s)

Q：風量(m^3/min)

M：使用冷媒の分子量

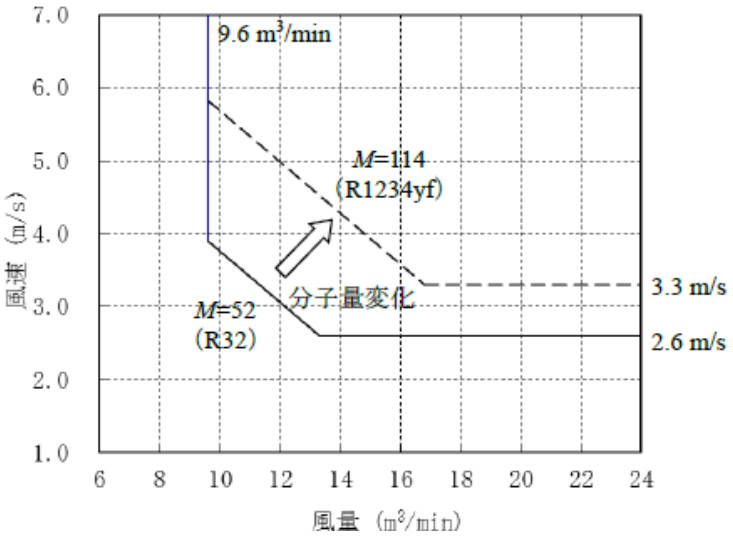


図 3-21　平形ショーケースにおける必要風量及び必要風速の関係

(3) 扉付平形ショーケース対策時の解析モデル及び解析結果

平形ショーケースにはスライド扉付のものもある．この扉が開いた時の影響を確認するため解析を行った．解析モデルは，**図 3-18** の扉なし平形ショーケースと同じもので行った．解析では 60 秒間はスライド扉を閉とし，60 秒後にスライド扉を開放した．スライド扉付きのショーケース形状を**図 3-22** に示す．また，解析条件を**表 3-8** に示す．

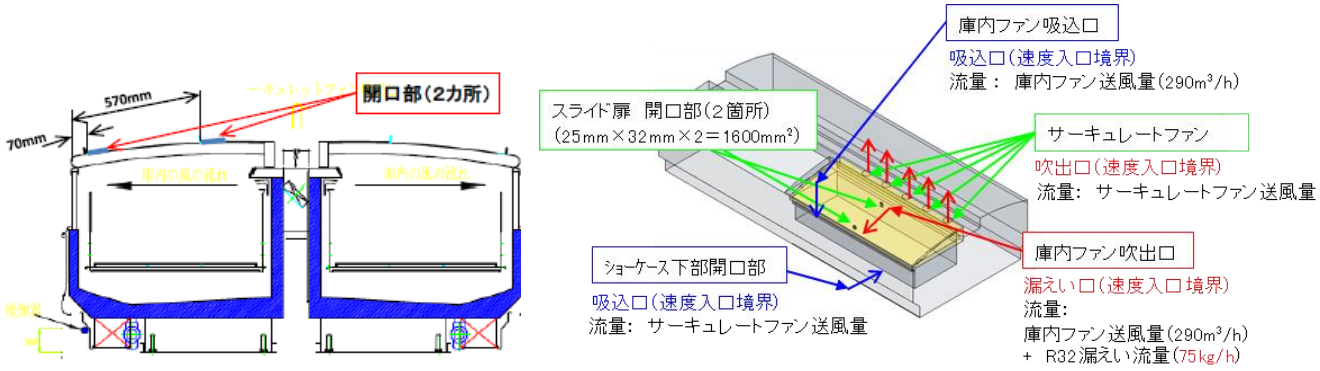


図 3-22　スライド扉付きショーケース諸元

表 3-8　スライド扉開閉時解析条件

漏れ箇所【R32】	床面積	漏えい高さ	冷媒量	漏えい速度	サーキュレートファン		スライド扉	
					風量	風速	～60s	60s～
	m^2	m	kg	kg/h	m^3/min	m/s		
庫内	84.7	0.0	20	75	13.3	2.6	閉	開

スライド扉，閉鎖時は，扉の微小な隙間より冷媒はわずかに噴出するが，床面には可燃域は，生成されない．

また，扉を開放した後は，溢れ出た冷媒が，サーキュレートファンに吸込まれ，吹き上げられることで可燃域が生成されない（**図 3-23**）．よって，サーキュレートファンによる安全対策は，スライド扉付平形ショーケースにおいても有効であることが確認された．

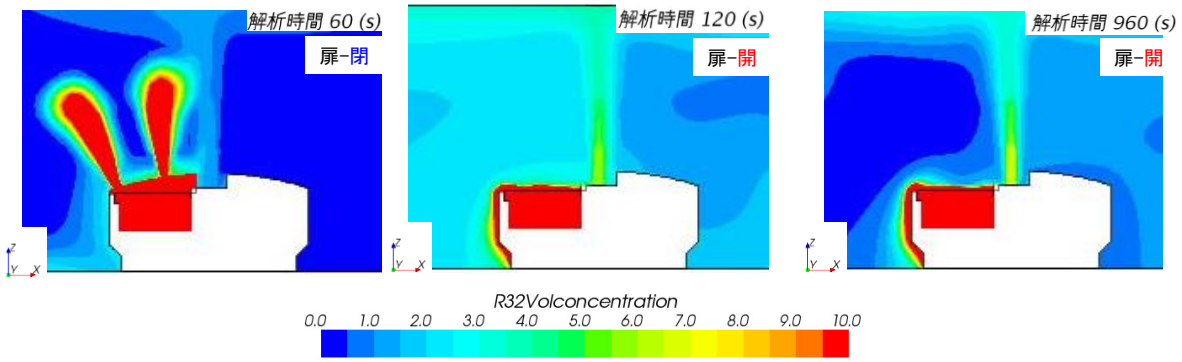


図 3-23 スライド扉付き平形ショーケースの濃度分布（対策時）

(4) 平形ショーケースの漏えい検知器取付け間隔の解析モデル及び解析結果

サーキュレートファンを常時運転することは可能であるが，運転音や電力量増加が懸念されるため，冷媒漏えいを検知した後にサーキュレートファンを運転させる検討を平形ショーケースにおいても行った．ピット内冷媒配管配管部漏れ及び庫内漏れの時に冷媒漏えい検知器が，10,000 ppm 程度で，検出可能な漏えい検知器の取付け間隔の解析を行った．

解析モデルは**図 3-24** に示す．2.5m 毎に測定点を設けた．その他，解析条件は**表 3-9** に示す．

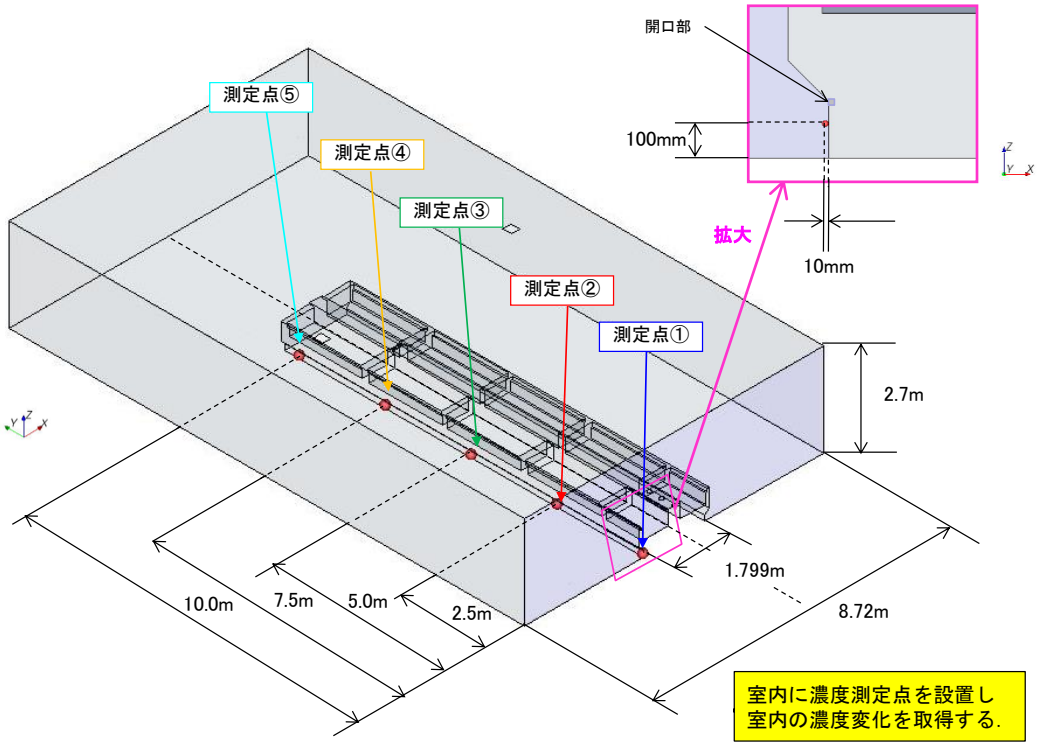


図 3-24　冷媒漏えい検知器測定点

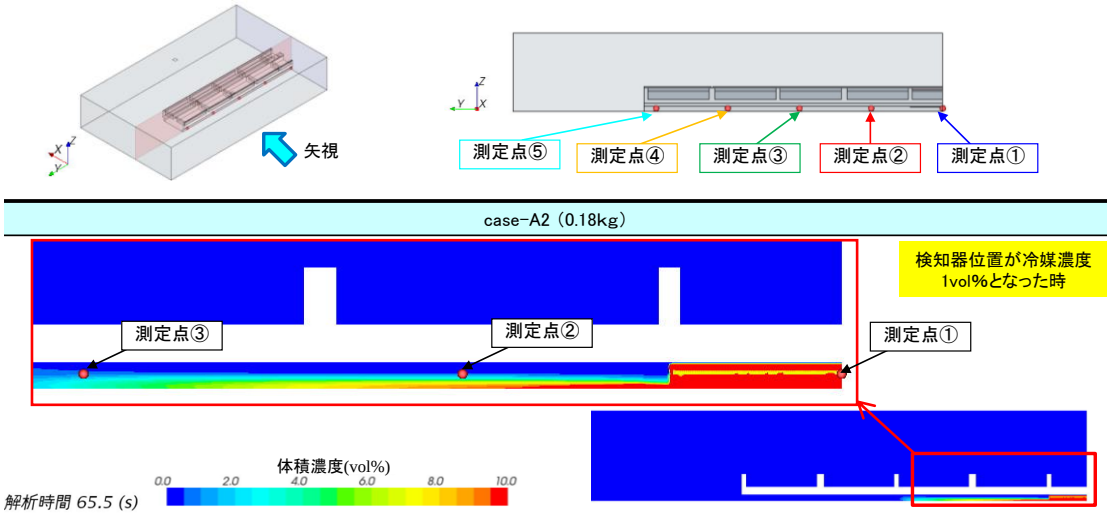
表 3-9　冷媒漏えい検知器取付け間隔解析条件

漏れ箇所【R32】	床面積	漏えい高さ	冷媒量	漏えい速度	サーキュレートファン
	m^2	m	kg	kg/h	
ﾋﾟｯﾄ内冷媒配管接続部	130.8	0.0	10	10	OFF
庫内	130.8	0.0	10	10	OFF

図 3-25 に解析結果を示す.

ビット部漏れ及び庫内漏れ共，測定点①にて冷媒が漏れた時に，5m 離れた測定点③において，10,000ppm 程度まで濃度が上昇することを確認した．従って，漏えい検知器は，オープン多段形ショーケースと同様に，ショーケースキックプレート部にショーケース両端から 5m で，10m 間隔で検知器を設置することで安全が確保できる.

＜ピット内冷媒配管接続部漏れ＞



＜庫内漏れ＞

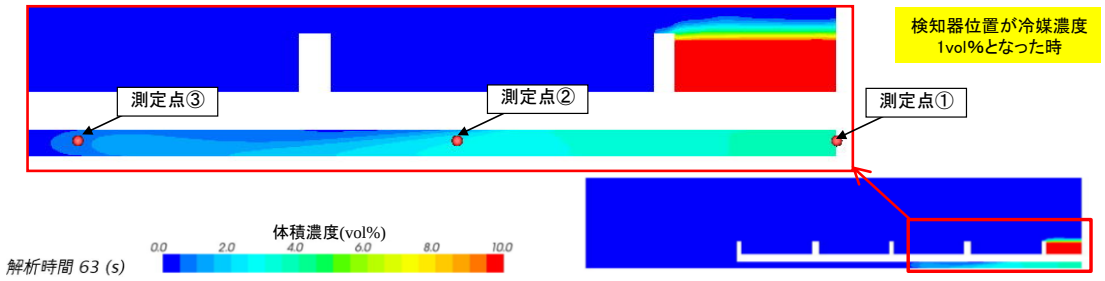


図 3-25　冷媒漏えい検知器取付け間隔

3.4　安全遮断弁の冷媒漏れ量

リーチインショーケース等のクローズドショーケースは，安全対策として，庫内への漏えい検知器の設置，及び液配管に安全遮断弁を装備としたが，安全遮断弁を閉じても僅かではあるが冷媒が庫内に漏れる．そこで，安全遮断弁が閉じたときの冷媒漏えい量が計算できないか検討を行った．なお，安全遮断弁は，実用上使用される電磁弁を対象に検討を行った．

(1) CV 値からの冷媒漏れ量計算

JRA GL-16 に安全遮断弁の仕様として「閉弁時漏れ量：300cm^3/min 以下(空気，ΔP=1.0MPa)」が規定されている．そこで「空気，ΔP=1.0MPa 条件で 300～100cm^3/min 流れる弁」を想定し，それぞれの流量に対する CV 値を用いてオリフィスを通る圧縮性流れ(液の場合は非圧縮性流れ)として，R32 の高圧側(3MPa)からの液冷媒漏れ量と低圧側(0.5MPa)からのガス冷媒漏れ量，及びそれらの合計を計算した．冷媒漏れ想定システムを**図 3-26** に，計算結果を**表 3-10** に示す．

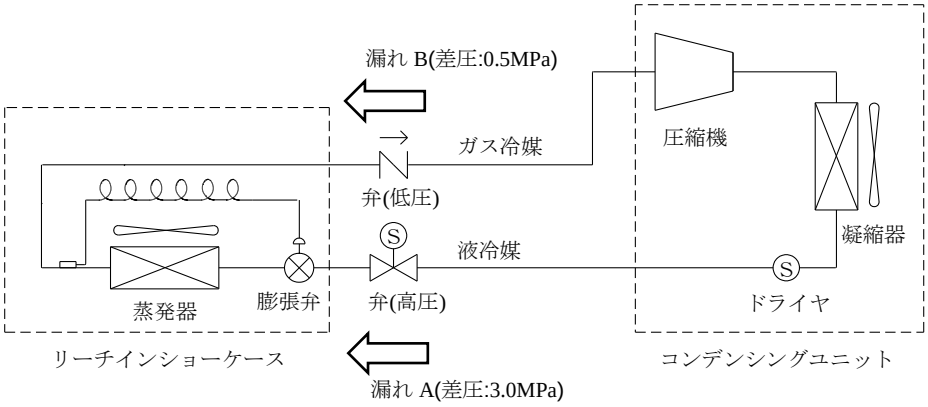


図 3-26　冷媒漏れ想定システム

表 3-10　漏れ量計算結果

空気弁漏れ量	漏れ A(差圧:3.0MPa)	漏れ B(差圧:0.5MPa)	漏れ合計
300[cm^3/min]時の冷媒漏えい量	9.36×10^{-5} [kg/s]	4.11×10^{-5} [kg/s]	1.35×10^{-5} [kg/s]
200[cm^3/min]時の冷媒漏えい量	6.22×10^{-5} [kg/s]	2.74×10^{-5} [kg/s]	8.95×10^{-5} [kg/s]
100[cm^3/min]時の冷媒漏えい量	3.11×10^{-5} [kg/s]	1.37×10^{-5} [kg/s]	4.48×10^{-5} [kg/s]

(注) 漏れ A は過冷却度 5℃の液冷媒，漏れ B はガス冷媒として計算．

(2) 電磁弁の冷媒漏れ量実測

漏れ量計算の妥当性を確認するため，弁のシート面がテフロン(PTFE)である樹脂弁と金属(C3604)である金属弁を供試弁として用い，空気漏れ量と冷媒漏れ量の相関を実測にて確認した．冷媒漏れ量の計測方法を**図 3-27** に示す．また，**図 3-27** に示す供試弁の製作方法，漏れ測定方法は以下手順のとおりとなる．

1. 供試弁の製作

   供試弁における空気の漏れ量が安定して狙いの値(300cm^3/min ΔP=1.0MPa)になるように，弁又は弁座を研磨布紙にて粗す.

2. 供試弁における空気の漏れ量測定

   供試弁を 3 回開閉させた後，弁閉状態にて一次側に空気圧 0.1～1.0MPa(0.1MPa 毎)，1.5MPa，2MPa，2.5MPa を加え，二次側からの漏れ量を測定する．

3. 供試弁における R32 冷媒の漏れ量測定

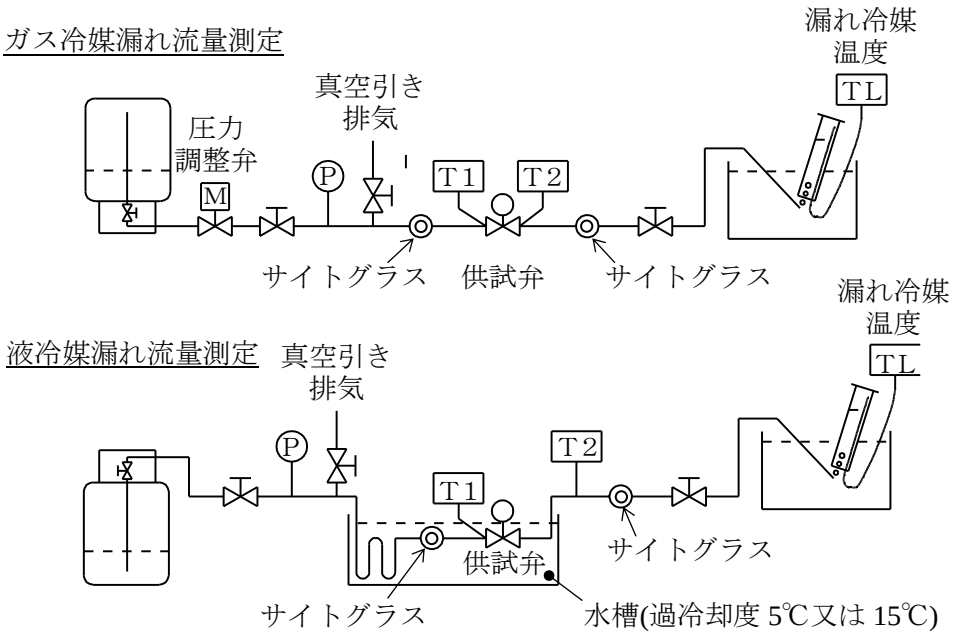
   冷媒の漏れ量は供試弁二次側からのガス漏れ量を水上置換法で測定する．なお，R32 の水分溶解はわずか[3-2)]であるため無視できるものとする．

   (A)ガス冷媒の漏れ量測定

   常温雰囲気中にて**図 3-27** のガス冷媒測定図のように配管し，供試弁を 3 回開閉させた後に弁閉させ，圧力調整弁を調節して供試弁一次側に 0.1～1.0MPa(0.1MPa 毎)及び，室温での飽和蒸気圧を加える．冷媒ガスの供給は冷媒ボンベを逆さにして，ガスのみが供給されるように行う．

   (B)液冷媒の漏れ量測定

   図 3-27 の液冷媒測定図のように配管接続し，雰囲気温度を 3 点(10℃付近，常温，30℃付近)変化させ，各雰囲気温度で 12 時間以上放置する．各雰囲気温度と冷媒ボンベの飽和蒸気圧が合致していることを確認した後，供試弁一次側のサブクールが 5℃，又は 15℃狙いとなるように温調水槽の温度を氷の量で調節する．それぞれの条件で供試弁を 3 回開閉させた後に弁閉させ，雰囲気温度における飽和蒸気圧力を一次側にかける．



記号	名称	測定器	メーカ	型番	レンジ[MPa]	表示精度
P	供試弁一次側圧力	圧力センサ	長野計器 株式会社	GC61-37G-27P3	0～ 0.5,1,2,3.5	±(1.0%F.S.+1digit) at 23℃
T1	供試弁一次側温度	T 形熱電対	-	-	-	-
T2	供試弁二次側温度					
TL	漏れ冷媒温度					

図 3-27　冷媒漏れ量の計測方法

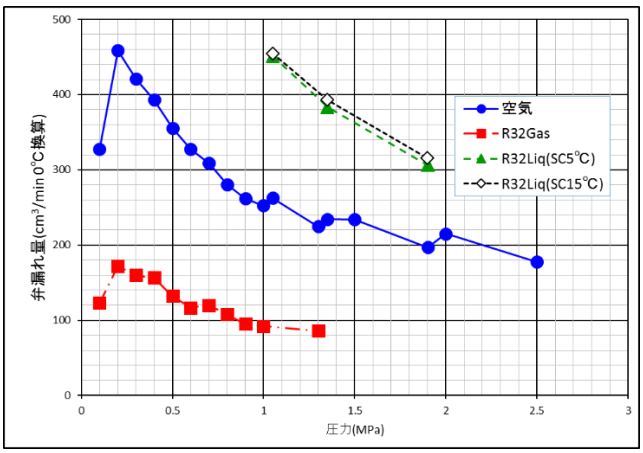
樹脂弁の冷媒漏れ量実測結果を**表 3-11** 及び**図 3-28**, 金属弁の冷媒漏れ量実測結果を**表 3-12** 及び**図 3-29** に，実測値と CV 値から漏れ量を計算した結果を**図 3-30** に示す.

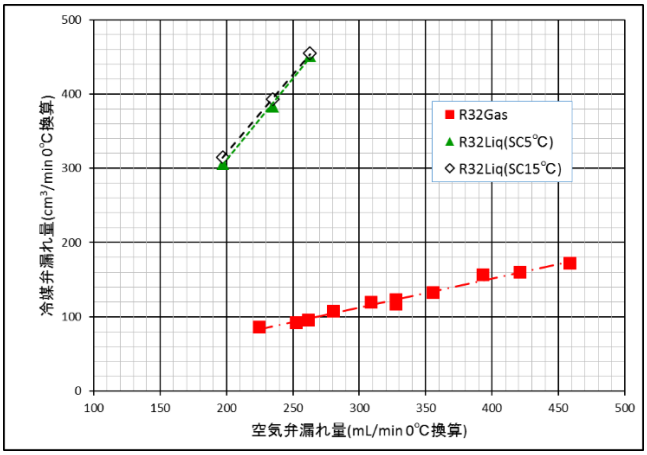
表 3-11　樹脂弁の冷媒漏れ量実測結果一覧

項目				樹脂(PTFE)弁（ΔP=1.0MPaにて弁漏れ300cm^3/min狙い，弁座全周の粗さ調整）													
ガス冷媒測定値	室温		℃	21.8													
	供試弁継手温度	1次側	℃	21.9	21.8	21.8	21.7	21.6	21.6	21.6	21.5	21.5	21.4	21.4	—	—	—
		2次側	℃	22.0	22.0	21.9	21.9	21.8	21.8	21.7	21.7	21.6	21.6	21.5	—	—	—
	漏れ冷媒温度		℃	23.1	23.1	23.1	23.0	23.0	23.0	23.0	23.0	23.0	23.0	22.9	—	—	—
	差圧		MPa	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	1.3	1.5	2.0	2.5
	漏れ量	1回目	cm^3/min	130	190	170	170	140	130	130	120	100	100	90	—	—	—
		2回目	cm^3/min	150	190	180	170	150	120	130	110	100	110	100	—	—	—
		3回目	cm^3/min	120	180	170	170	140	130	130	120	110	90	90	—	—	—
		上記3回平均	cm^3/min	133	187	173	170	143	127	130	117	103	100	93	—	—	—
		質量流量	kg/s	4.84 ×10^{-6}	6.77 ×10^{-6}	6.29 ×10^{-6}	6.17 ×10^{-6}	5.20 ×10^{-6}	4.60 ×10^{-6}	4.70 ×10^{-6}	4.23 ×10^{-6}	3.75 ×10^{-6}	3.63 ×10^{-6}	3.39 ×10^{-6}	—	—	—
空気	漏れ量	測定値(18.8℃)	cm^3/min	350	490	450	420	380	350	330	300	280	270	240	250	230	190
		0℃換算	cm^3/min	327	458	421	393	356	327	309	281	262	253	225	234	215	178
液冷媒測定値	室温		℃	10.5		20.1		32.0		—	—	—	—	—	—	—	—
	一次側配管温度		℃	11.5	11.4	19.8	19.7	31.2	31.2	—	—	—	—	—	—	—	—
	一次側継手の温度		℃	6.9	2.2	14.2	5.1	25.1	13.5	—	—	—	—	—	—	—	—
	サブクール		℃	4.6	9.2	5.6	14.6	6.1	17.7	←サブクールは5℃，15℃狙い．ただし室温10.5℃時は0℃以下になり温調できないため15℃狙いが9.2℃となっている．							
	二次側配管温度		℃	8.1	7.9	8.6	8.2	9.5	9.5								
	漏れ冷媒温度		℃	11.2	11.2	19.1	18.8	30.1	30.2								
	差圧		MPa	1.05		1.35		1.9		—	—	—	—	—	—	—	—
	漏れ量	1回目	cm^3/min	450	450	410	440	340	350	—	—	—	—	—	—	—	—
		2回目	cm^3/min	490	480	430	420	360	340	—	—	—	—	—	—	—	—
		3回目	cm^3/min	470	490	390	400	320	360	—	—	—	—	—	—	—	—
		上記3回平均	cm^3/min	470	473	410	420	340	350	—	—	—	—	—	—	—	—
		質量流量	kg/s	17.1 ×10^{-6}	17.2 ×10^{-6}	14.9 ×10^{-6}	15.2 ×10^{-6}	12.3 ×10^{-6}	12.0 ×10^{-6}	—	—	—	—	—	—	—	—
空気	漏れ量	測定値(17.9℃)	cm^3/min	280		250		210		—	—	—	—	—	—	—	—
		0℃換算	cm^3/min	263		235		197		—	—	—	—	—	—	—	—

表 3-12　金属弁の冷媒漏れ量実測結果一覧

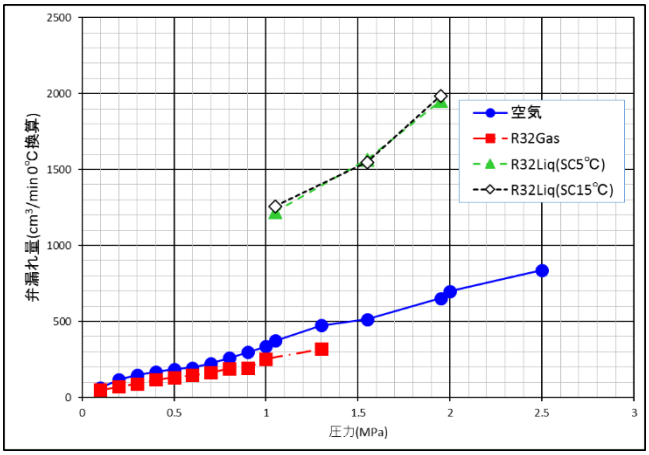
項目				金属(C3604)弁（ΔP=1.0MPaにて弁漏れ300cm^3/min狙い，弁全周の粗さ調整）													
ガス冷媒測定値	室温		℃	24.1													
	供試弁継手温度	一次側	℃	23.2	23.2	23.3	23.3	23.2	23.1	23.2	23.3	23.2	23.2	23.3	—	—	—
		二次側	℃	22.4	22.3	22.4	22.4	22.2	22.3	22.4	22.3	22.3	22.2	22.2	—	—	—
	漏れ冷媒温度		℃	23.5	23.5	23.6	23.6	23.6	23.6	23.5	23.6	23.7	23.6	23.7	—	—	—
	差圧		MPa	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	1.3	1.5	2.0	2.5
	漏れ量	1回目	cm^3/min	50	70	100	120	140	160	180	210	240	280	340	—	—	—
		2回目	cm^3/min	50	80	100	130	150	160	170	200	240	270	350	—	—	—
		3回目	cm^3/min	60	80	90	130	140	160	180	210	150	280	350	—	—	—
		上記3回平均	cm^3/min	53	77	97	127	143	160	177	207	210	277	347	—	—	—
		質量流量	kg/s	1.94 ×10^{-6}	2.78 ×10^{-6}	3.51 ×10^{-6}	4.60 ×10^{-6}	5.20 ×10^{-6}	5.81 ×10^{-6}	6.41 ×10^{-6}	7.50 ×10^{-6}	7.62 ×10^{-6}	10.0 ×10^{-6}	12.6 ×10^{-6}	—	—	—
空気	漏れ量	測定値(20.1℃)	cm^3/min	70	125	160	180	200	210	240	280	320	360	510	600	750	900
		0℃換算	cm^3/min	65	116	149	168	186	196	224	261	298	335	475	559	699	838
液冷媒測定値	室温		℃	11.0		24.3		32.5		—	—	—	—	—	—	—	—
	一次側配管温度		℃	11.3	11.4	24.5	24.5	31.9	31.6	—	—	—	—	—	—	—	—
	一次側継手の温度		℃	6.2	2.1	18.5	10.4	25.6	14.2	—	—	—	—	—	—	—	—
	サブクール		℃	5.1	9.3	6	14.1	6.3	17.4	←サブクールは5℃，15℃狙い．ただし室温11.0℃時は0℃以下になり温調できないため15℃狙いが9.3℃となっている．							
	二次側配管温度		℃	-5.2	-5.5	-6.4	-6.3	-7.5	-7.8								
	漏れ冷媒温度		℃	8.8	9.1	16.5	16.4	26.4	26.8								
	差圧		MPa	1.05		1.55		1.95		—	—	—	—	—	—	—	—
	漏れ量	1回目	cm^3/min	1230	1320	1650	1650	2130	2190	—	—	—	—	—	—	—	—
		2回目	cm^3/min	1260	1290	1650	1620	2160	2190	—	—	—	—	—	—	—	—
		3回目	cm^3/min	1290	1290	1680	1650	2130	2160	—	—	—	—	—	—	—	—
		上記3回平均	cm^3/min	1260	1300	1660	1640	2140	2180	—	—	—	—	—	—	—	—
		質量流量	kg/s	45.7 ×10^{-6}	47.2 ×10^{-6}	60.2 ×10^{-6}	59.5 ×10^{-6}	77.7 ×10^{-6}	79.1 ×10^{-6}	—	—	—	—	—	—	—	—
空気	漏れ量	測定値(19.5℃)	cm^3/min	400		550		700		—	—	—	—	—	—	—	—
		0℃換算	cm^3/min	373		513		653		—	—	—	—	—	—	—	—

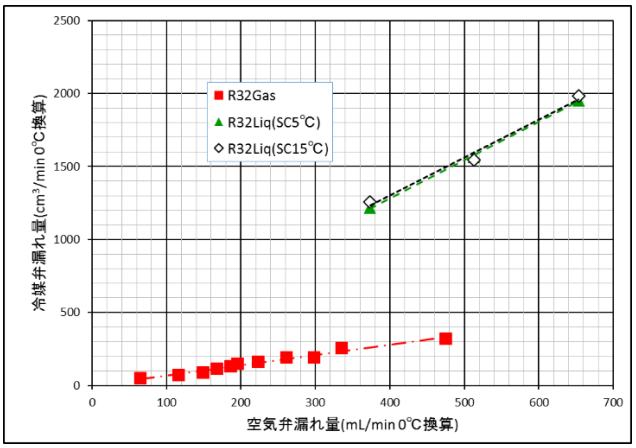




圧力と各流体による弁漏れ量　　空気と冷媒の弁漏れ量相関

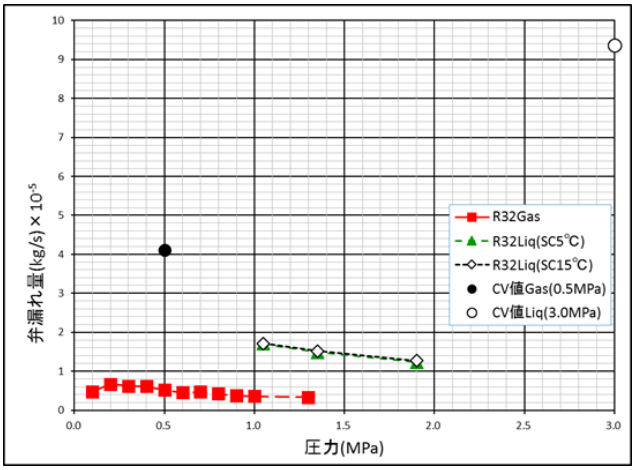
図 3-28　樹脂弁の冷媒漏れ量実測結果

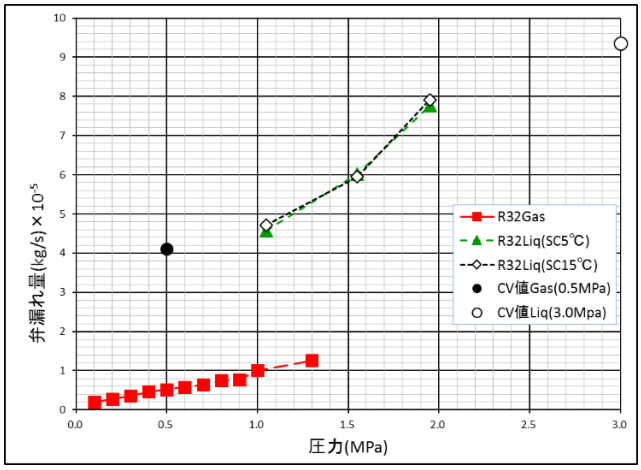




圧力と各流体による弁漏れ量　　空気と冷媒の弁漏れ量相関

図 3-29　金属弁の冷媒漏れ量実測結果





樹脂弁　　金属弁

図 3-30　冷媒漏れ量（質量流量）実測結果と CV 値を用いた計算結果との比較

金属弁はオリフィスのような固定された形状であると考えられるため，差圧の増加に伴い流量が増加していくが，樹脂弁では圧力の増加に反して流量が減少していく結果となった．樹脂弁における結果は，弁が圧力によって押されてシール面の変形によって隙間が小さくなったためと考えられる．実験におけるガス冷媒と液冷媒の漏れ量を比較すると，液冷媒の方が密度が大きいために漏れ量が大きくなった．CV 値を用いた計算結果と実測結果を比較すると，金属弁における液冷媒の漏れ量は圧力と漏れ量の関係が一致しているものの，ガス冷媒の漏れ量は非常に過大な予測となっており，これは CV 値を用いた流路計算においては摩擦損失を考慮していないため，液よりも密度の低いガス冷媒の計算漏れ量が過大になっていると考えられる．また，樹脂弁におけるガス冷媒の漏れ量と液冷媒の計算漏れ量は非常に過大な予測となっており，これは CV 値を用いた流量計算において，前述した樹脂弁の流量特性や弁と弁座の隙間において大きな影響を持つ流路摩擦が考慮されていないためだと考えらる．これらの結果から，CV 値から弁漏れ量の計算を行うのではなく，別の手段の検討が必要となった．

そこで，平行隙間の流れを計算できるモデル式の検討を行った（詳細は参考資料 1 参照）．

(3) 平行平板モデルによる検討結果

詳細は参考資料 1 に記載したが，ガス冷媒の漏れ量は，液冷媒の漏れ量よりはるかに小さいため，漏れ量計算は液冷媒のみを計算することとした．

平行平板モデルを用いた計算値と差圧に対する漏れ量の実測値の比較を**図 3-31** 及び**図 3-32** に記載する．参考のため，空気 1.0[MPa]の漏れ量 300[cm^3/min]相当の CV 値から計算した結果も記載する．

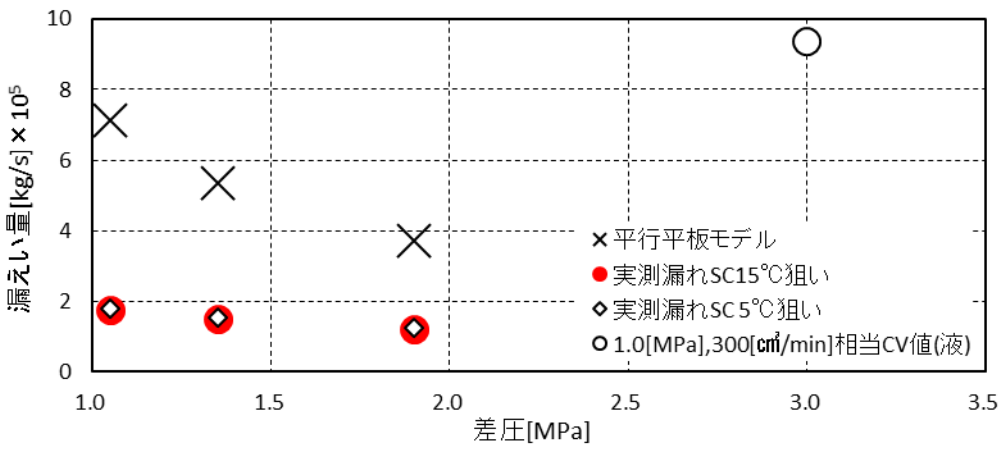


図 3-31　樹脂弁の差圧と漏えい量 計算・実測・1.0[MPa]300[cm^3/min]相当 CV 値を用いた計算の比較

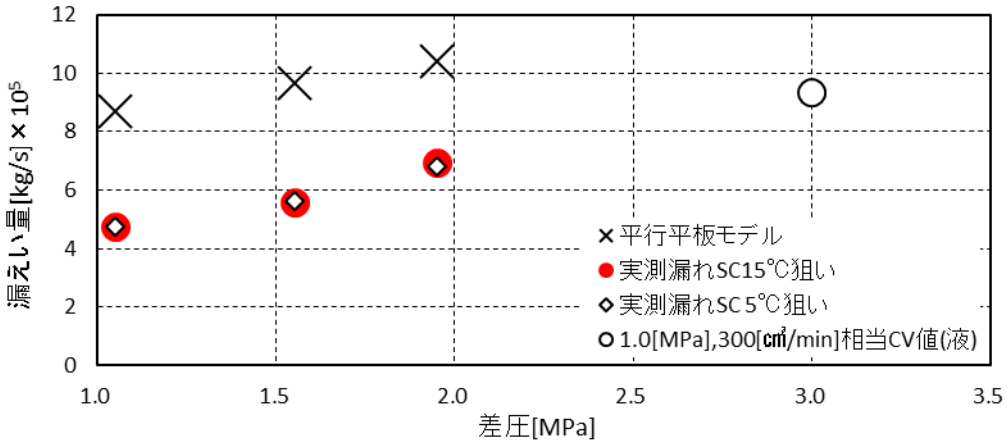


図 3-32　金属弁の差圧と漏えい量 計算・実測・1.0[MPa]300[cm^3/min]相当 CV 値を用いた計算の比較

モデル式による冷媒漏えい量の計算値は実測における差圧の上昇に対する実測値の傾向をよく表しているが，その大きさは樹脂弁でも金属弁でも計算値の方が 2～5 倍程度大きい結果となった．漏れ量が過大評価されるという結果は装置の設計に対しては安全な方向になる．計算と実測が乖離した原因は，計算に入れてない要素があると考えられるが推定される原因は次のとおり．

- 一次側圧力に対する隙間変化を空気を用いた実験に基づいて考慮しているが，計算は液冷媒に対して行っており，隙間の変化が適正に与えられていないため
- 現在のモデルは平行平板間の流れとしてつくられているが，実際の流れは表面の粗さ内の微小な隙間を通る流れであるため
- 流路中の流体の状態変化を断熱変化として扱っているため
- 温度によって表面の性状が変わることにより隙間が変化する可能性があるため

本内容で冷媒漏えい量を算出するために運用するには更なる検討が必要になる．

3.5　各ショーケースの冷媒漏れ高さと許容冷媒封入量

冷媒漏えい解析に用いた冷媒量は，解析モデル店舗に設置されるコンデンシングユニットの最大冷媒量を考慮して 20kg としたが，実際には，冷媒が漏えいしたときの延焼を防止するための措置として冷媒量が以下のように制限されるので，設計時には注意が必要となる．

(1) 高さ 1.5 m 未満の低多段形オープンショーケース以外の上部冷媒配管（**図 3-33**）

漏えい箇所（上部冷媒配管及びショーケースの接合部）の高さに床面積を乗じた容積で除した値を LFL の 4 分の 1 以下とする必要があり，封入可能な冷媒量は式(3.3)で求める．

$$m \leqq \frac{G}{4} \times A \times h_r \qquad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (3.3)$$

ここに，G ： LFL （kg/m^3）

A ： 床面積 （m^2）

h_r ： 漏えい高さ（上部冷媒配管及びショーケースの接合部の高さ） （m）

m ： 冷媒量 （kg）

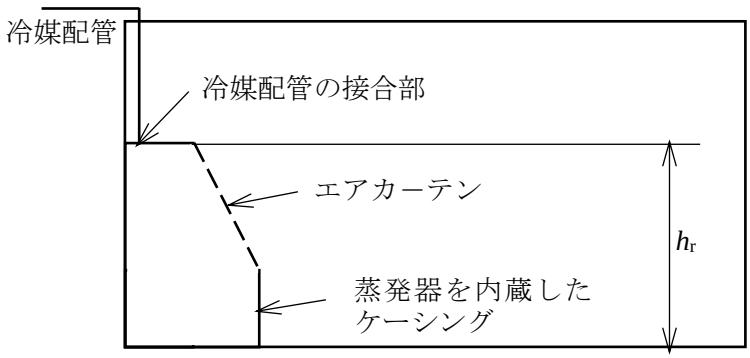


図 3-33　多段形オープンショーケースにおける漏えい高さ

(2) ピット内冷媒配管接続の場合又はセミ多段形オープンショーケースの場合（**図 3-34**）

サーキュレートファンで床面近くの漏えい冷媒を店舗内の上部にかくはんした状態で次の規定に適合させる．

a)多段形オープンショーケース及びリーチインショーケースの場合

冷媒量を，サーキュレートファンの上端高さ及び床面積を乗じた容積で除した値を LFL の 4 分の 1 以下とする．

b)平形ショーケース及びセミ多段形オープンショーケースの場合

冷媒量を，かくはん高さ及び床面積を乗じた容積で除した値を LFL の 4 分の 1 以下とする必要があり．封入可能な媒量は式(3.4)で求める．

$$m \leqq \frac{G}{4} \times A \times h_s \qquad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (3.4)$$

ここに，A ： 室の床面積 （m^2）

G ： LFL （kg/m^3）

h_s ： かくはん高さ（多段形オープンショーケースの場合はサーキュレートファンの上端高さ，平形ショーケース及びセミ多段形オープンショーケースの場合はサーキュレートファンの上端高さに 1.8 m を加えた値） （m）

m ： 冷媒量 （kg）

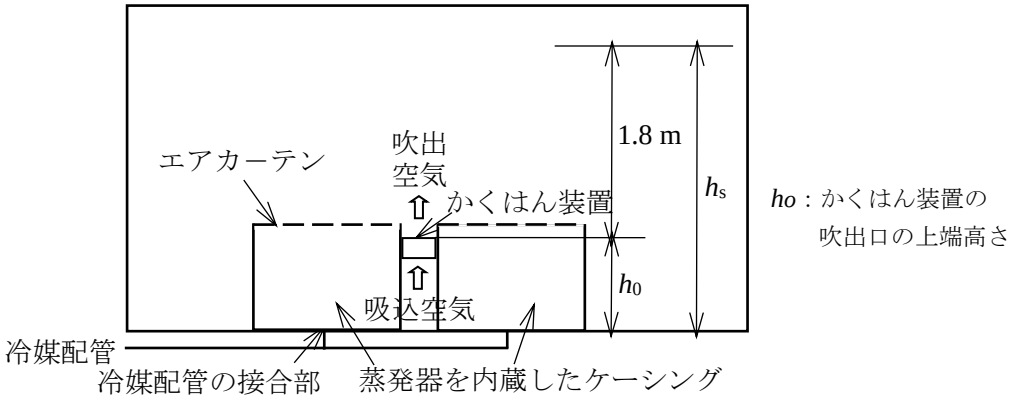


図 3-34 平形オープンショーケースにおける鉛直上向きかくはん時の漏えい高さ

なお，ショーケースが複数台設置される場合は，ウォークインショーケースを除く全ショーケースの（1）で規定する漏えい高さ及び(2)で規定するかくはん高さのうちで最も低い値が，式(3.5)を満たす必要があり，これを満たさない場合は，設置禁止となるので注意が必要である．

$$m \leqq \frac{G}{4} \times A \times h_m \qquad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(3.5)$$

ここに， A ： 室の床面積 （m^2）

G ： LFL （kg/m^3）

h_m ： 全ショーケースの漏えい高さ及びかくはん高さのうちで最も低い値 （m）

m ： 冷媒量 （kg）

4. 着火源の存在確率

微燃性冷媒は強燃性冷媒である R290 などと異なり，微燃性冷媒リスク評価研究会（平成 26 年度プログレスレポート[4-1)]）の着火源評価結果より，コンセント，電源スイッチ，喫煙用具のうちの電子ライターのスパーク（オイルライター，マッチは着火源），人体から発生する静電気では着火しない．また，着火に対する最高許容表面温度は**表 3-1** より 700℃となっており，別置ショーケースに組み込まれている除霜ヒーター等の表面温度は最高許容表面温度に達しない為，着火しない．微燃性冷媒の着火源となるのは裸火，金属スパークと電気品スパーク（電源用遮断器や電磁開閉器，接触器，リレー，その他作動時にスパークが発生する電気品）に絞られた．電気品スパークが発生する電源用遮断器，電磁開閉器については，一般用として可燃性雰囲気内での使用は想定されておらず，スパーク発生時のガスを排出するために開口部が設けられている．発生するスパークが着火源となるか否かに関しては，開口部の許容有効穴寸法が IEC 61D/386/FDIS[4-2)]の Annex JJ において検討されており，式(4.1)が記載されている．

$$d_{eff} = 22.3 \times Su^{-1.09} \leqq 7\ \mathrm{mm} \qquad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(4.1)$$

(d_{eff}：許容有効穴寸法 [mm]，Su：冷媒燃焼速度 [cm/s])

式(4.1)の計算値より穴径が大きい場合には，実験により着火源となるか否かを確認しなければならない．また，電気品スパークは電気容量が大きいほどエネルギーが大きく，着火源となり得るが，着火源となる電気容量の算出式として式(4.2)が IEC61D1/386/ FDIS[4-2)]の 22.116 に記載されている．

$$\text{電気容量(kVA)} = 5 \times \left(\frac{6.7}{Su}\right)^4 \qquad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(4.2)$$

(Su：冷媒燃焼速度[cm/s])

本来，電源用遮断器や電磁開閉器，接触器，リレー，その他作動時にスパークが発生するものが着火源となるか否かに関しては，式(4.1)にある消炎直径（許容有効穴寸法）から評価を行うべきだが，フィールドで扱う際の扱いやすさ等から電気容量で確認を行うこととした． 本来は式(4.2)で計算される電気容量を使用すべきだが，ADL 社（Arthur.D.Little 社）の報告書 DOE/CE/23810-92(1998)[2-2)] より，R32 の場合，5 kVA 以下では着火源とならないと判断できるので，式(4.2)での計算値が 5kVA よりも十分小さい場合は，着火源が異ならないかを評価する必要があるとした．

表 4-1 に抽出・検討したスパーク及び裸火に対する着火の可能性有無を示す．

また，別置ショーケースの LS ごとに絞り込んだ着火源がリスクとして存在するかどうかの洗い出しを行い，リスクとして存在する着火源の存在確率の算出を行った．LS ごとの着火源一覧を**表 4-2** に示し，LS ごとの作業内容を想定し，状況ごとに着火源となる各機器，裸火の存在確率を**表 4-3** に示す．

コンデンシングユニット使用条件は，店舗用パッケージエアコン，ビル用マルチエアコンと同一であることから，着火源の存在確率は，それらの数値を流用した．参考に店舗用パッケージエアコンの着火源存在確率を**表 4-4** に示す．

表 4-1　着火源一覧

		着火源	着火	備考
スパーク（可燃空間中で発生）	喫煙器具	マッチ	○	–
		石油ライター	○	–
		電子ライター	×	スパークで着火しない
	電気部品	電化製品（火災原因）	○	漏電スパーク
		家電製品，小形電気機器	×	5 kVA 以下
		機器内電気部品	○	5 kVA 以上の電磁接触器
		電源コンセント	×	消炎直径相当
		照明スイッチ	×	消炎直径相当
	作業ツール	金属スパーク（フォークリフト爪）	×	運搬時冷媒なし
		電動工具	○	電動ドリル等，使用頻度は低い
		冷媒回収機	×	最小着火エネルギー以下
	人体	人体からの静電気	×	最小着火エネルギー以下
裸火（可燃空間と接触）	喫煙器具	マッチ	○	着火＝裸火
		オイルライター，電子ライター	○	着火した裸火から
	燃焼機器	燃焼式暖房機	○	着火＝裸火
		燃焼式給湯器	○	着火＝裸火
		燃焼式ボイラー	○	着火＝裸火
		燃焼式調理器	○	着火＝裸火
	作業ツール	ろう付けバーナー	○	着火＝裸火

（○：着火の可能性あり，×：着火の可能性なし）

表 4-2　LS ごとの着火源一覧

LS	喫煙以外の着火源	喫煙による着火源
据付	裸火（ろう付けバーナー），スパーク（電気品）	マッチ・オイルライター
使用（売場）	裸火（ストーブ・カセットコンロ），スパーク（電気品）	― （売場での喫煙者無し）
使用（バックヤード）	裸火（コンロ・給湯器・炊飯器・フライヤー・オーブン），スパーク（電気品）	― （バックヤードでの喫煙者無し）
修理	裸火（ろう付けバーナー・カセットコンロ），スパーク（電気品）	― （売場での喫煙者無し）
廃棄	裸火（ろう付けバーナー），スパーク（電気品）	マッチ・オイルライター

表 4-3　着火源存在確率（別置ショーケース）

<table>
<tr><th colspan="3">着火源存在確率　【-】</th><th>備考</th></tr>
<tr><td rowspan="3">スパーク</td><td colspan="2">電磁接触器スパーク</td><td>1.54×10^{-5}</td><td>$P=\frac{2\times10}{24\times3600\times15}$
・5 kVA 以上の電磁接触器（除霜ヒータ）を有するケースの出荷比率 1/15 程度，開閉時間 2 s /回，動作回数 10 回/日</td></tr>
<tr><td colspan="2">電動工具スパーク</td><td>6.94×10^{-7}</td><td>$P=\frac{0.0001\times10}{24\times60}$
・電動ドリル（ホールソー）グラインダ等の電動工具使用率 0.01%，使用時間 10 分/回</td></tr>
<tr><td colspan="2">漏電スパーク
（電化製品火災原因）</td><td>2.31×10^{-8}</td><td>$P=\frac{0.001\times2}{24\times60\times60}$
・電気工事人的作業ミス（ヒューマンエラー）1×10^{-3}，スパーク持続時間 2 s /回</td></tr>
<tr><td rowspan="8">裸火</td><td rowspan="7">燃焼設備</td><td>燃焼式調理器
（ｶｾｯﾄｺﾝﾛ）</td><td>8.33×10^{-5}</td><td>使用 2 h /日，普及率 0.1%</td></tr>
<tr><td>燃焼式暖房機</td><td>4.17×10^{-5}</td><td>使用 10 h /日，普及率 0.01%</td></tr>
<tr><td>ガス給湯器</td><td>8.33×10^{-2}</td><td>使用 5 h /日，湯沸器普及率 99%，ガス器具比率 50%</td></tr>
<tr><td>ガス炊飯器</td><td>8.33×10^{-2}</td><td>使用 5 h /日，インストア調理率 80%，ガス器具比率 50%</td></tr>
<tr><td>ガスオーブン</td><td>8.33×10^{-2}</td><td>使用 5 h /日，インストア調理率 80%，ガス器具比率 50%</td></tr>
<tr><td>ガスフライヤー</td><td>8.33×10^{-2}</td><td>使用 5 h /日，インストア調理率 80%，ガス器具比率 50%</td></tr>
<tr><td>ガスコンロ</td><td>8.33×10^{-2}</td><td>使用 5 h /日，インストア調理率 80%，ガス器具比率 50%</td></tr>
<tr><td colspan="2">喫煙器具
（マッチ/石油ライター）</td><td>2.53×10^{-5}</td><td>$P=0.303\times0.1\times1.67\times10^{-2}\times0.05$
・作業者（成人男性）の喫煙率 30.3%（2014 年 JT 調査），喫煙しながら作業する確率 10%（ADL の値使用・修理中に最大 10%の時間喫煙），喫煙中のマッチ/ライターの着火時間率 1.67×10^{-2}（ADL の値使用・喫煙 5 分中に着火 5 s の比率），マッチ・石油ライター使用率：0.05</td></tr>
</table>

表 **4-4**　着火源存在確率（店舗用パッケージエアコン）

着火源存在確率【単位】			地上	各階	半地下	狭小	備考
スパーク （時間・空間当りの発生回数）【回/m^3min】	室外機		1.4×10^{-14}	9.5×10^{-14}	2.5×10^{-14}	9.1×10^{-14}	Pt（空間的遭遇確率）=5.6/7,800,000/空間容積/(365×24×60) 事故件数：5.6 件/年（NITE ）．存在台数：7.8 百万台．
	喫煙器具	作業者	3.6×10^{-10}	1.3×10^{-9}	1.7×10^{-9}	1.7×10^{-9}	【作業者の喫煙】 P=機器近傍確率× 0.1[年間ｻｰﾋﾞｽ率]×[喫煙率]×(16[本]/空間容積/(24×60))×0.05［スパーク］×0.01[訓練無視確率] ・機器近傍確率：地上：0.2，各階：0.1，半地下・狭小：0.5 ・作業者の喫煙率：0.322(日本人男性：JT調査） ・喫煙本数（執務時）：16 本/日（総務庁調査） ・［ｽﾊﾟｰｸ］マッチ・石油ライター使用率：0.05
		使用者	5.6×10^{-8}	5.4×10^{-8}	1.1×10^{-7}	1.1×10^{-7}	【使用者（ユーザー）の喫煙】 P=使用者が周辺に居る確率×[喫煙率]×(17.1[本]/空間容積/(24×60))×0.05［スパーク］×[周辺喫煙可率] ・周辺に居る確率：地上・半地下・狭小：0.05，各階：0.0125 ・喫煙率：0.209(日本人成人）・喫煙本数：17.1　本/日/人 ・周辺喫煙可率：地上・半地下・狭小：0.9，各階：0.5
裸火 （存在確率）【-】	喫煙	作業者	6.0×10^{-8}	3.0×10^{-8}	1.5×10^{-7}	1.5×10^{-7}	【作業者の喫煙】 P=機器近傍確率×0.1[年間ｻｰﾋﾞｽ率]×0.322[喫煙率]×(16[本]×5［秒/本：裸火燃焼時間］/(24×60×60))×0.01[訓練無視確率] 【使用者（ユーザー）の喫煙】 P=使用者が周辺に居る確率×0.209[喫煙率]×(17.1[本]×5［秒/本：裸火燃焼時間］/(24×60×60))×[周辺喫煙可率]
		使用者	9.3×10^{-6}	1.3×10^{-6}	9.3×10^{-6}	9.3×10^{-6}	
	燃焼式給湯器		6.6×10^{-4}	2.2×10^{-4}	2.2×10^{-4}	2.2×10^{-4}	P=運転率×0.001[普及率] ・運転率…地上　　：0.66（24H/日，20 日/月） 地上以外：0.22（8H/日，20 日/月）

(注記) コンデンシングユニットの着火源存在確率も，**表 4-4** の値を使用．

5. ショーケースのリスクアセスメント結果と安全対策

5.1 据付ステージ

(1) 新店ステージ

新店ステージの FTA を検討した．新店においては，配管工事等の据付工事作業を行う際，ショーケースにはまだ冷媒が封入されていない状態での作業となるため，ろう付けバーナー等の着火源が存在する作業時には冷媒漏えいリスクはゼロとなる．ショーケース据付工事終了後の試運転時にショーケースへ冷媒が充填されることとなり，そのときの着火源としては，試運転時の作業員の喫煙を想定し，冷媒漏えい要因としては，配管据付工事の不具合のみを想定し FTA に組込んだ．店舗の空間体積は，コンビニエンスの一般店舗レベルの敷地を想定し，84.7m^2×高さ 2.7m の 228.69m^3（解析モデル詳細は，**3.1** を参照）として空間的遭遇確率を計算した．FTA 算出の結果，着火確率は**表 5-1** の結果となり，いずれも許容値（2.00×10^{-7}）以下となった．

表 5-1　新店ステージの算出結果

冷媒	オープンショーケース	リーチインショーケース庫内漏れ
R32	3.11×10^{-9}	6.67×10^{-11}
R1234yf	6.52×10^{-9}	1.40×10^{-10}

(2) 改装及び追加ステージ

改装及び追加ステージの FTA を検討した．改装及び追加によるショーケース据付時は，既に設置されているショーケースに冷媒が充填されている状態で配管工事等の据付工事作業を行うため，着火源としては，①ろう付けバーナー②バーナーでの配管溶断作業③作業員の喫煙④それ以外（電気スパーク）を想定した．その際の冷媒漏えい要因として，①②に対しては冷媒配管工事時の冷媒配管内の冷媒の残存と既に設置されている別のショーケースからの漏えいを想定した．③④に対しては，配管据付工事の不具合を想定し FTA に組込んだ．ろう付け作業による着火空間としては，バーナーを使用した作業スペースを 3m×2m×3m＝18m^3 として空間的遭遇確率を計算した．

FTA 算出の結果，着火確率は**表 5-2** の結果となり，いずれも許容値（2.00×10^{-7}）を上回る結果となった．着火確率が高くなった要因としては，ろう付けバーナー使用時に冷媒配管内の冷媒の残存に気付かないことが主な要因である．以上を踏まえ，着火確率を低減策として以下を提案した．

表 5-2　改装及び追加ステージの算出結果

冷媒	オープンショーケース	リーチインショーケース庫内漏れ
R32	5.83×10^{-6}	7.68×10^{-7}
R1234yf	6.90×10^{-6}	9.31×10^{-7}

対策 1　冷媒漏えい検知器の携行と教育の実施

改装及び追加設置の据付時には，ろう付けバーナー使用時や活線作業時等の着火源になり得る作業を実施する際には必ず漏えい検知器にて，周囲の冷媒漏えいをチェックすることを義務付ける教育を実施する．漏えい検知器携行によりリスクを 1/100 に低減できるが，20 回に 1 回程度は携行を忘れるとし，

リスク低減は 1/100×19/20+1×1/20 となるため，1/20 とした．

対策２　バーナーの取扱いに関する注意喚起，教育の実施

改装及び追加設置の据付時には，微燃性冷媒を使用しているため，冷媒配管内の残存冷媒が着火源となりバーナーに着火する可能性がある．そのため，バーナーによる配管溶断は冷媒の残存の有無を確認出来ない箇所においては禁止とする教育を実施する．本教育により，作業者の意識向上を行い，配管溶断の頻度を減らすことができるため，リスク低減効果を 1/10 とした．

対策３　冷媒回収作業に関する注意喚起と教育の実施

改装及び追加設置の据付時には，微燃性冷媒を使用しているため，冷媒配管内の残存冷媒が着火源となりバーナーに着火する可能性がある．そのため冷媒の回収の重要性を認識させる教育を実施し，冷媒回収は確実に行い，冷媒配管内の冷媒の残存が無いことを必ず確認した上で作業を行うよう注意喚起を行う．本教育により，作業者の意識向上を行い，冷媒回収不十分（時間的制約）となる確率を減らすことができるため，リスク低減効果を 1/10 とした．

上記の安全対策を施した場合の着火確率は**表 5-3** の結果となり，いずれも許容値（2.00×10^{-7}）以下となった．

表 5-3　改装及び追加ステージの対策後算出結果

冷媒	オープンショーケース		リーチインショーケース庫内漏れ	
	未対策	対策後	未対策	対策後
R32	5.83×10^{-6}	4.65×10^{-8}	7.68×10^{-7}	8.89×10^{-9}
R1234yf	6.90×10^{-6}	4.66×10^{-8}	9.31×10^{-7}	1.06×10^{-8}

5.2　使用ステージ

店舗内に設置されているショーケースの使用時における RA を検討した．

店舗内では，お客様などの出入りが多く，特に安全面の検討が課題となった．また店舗内，バックヤード内の着火源が存在する場所，燃焼式暖房機，カセットコンロ，ガス給湯器，ガス炊飯器，ガスオーブン，ガスフライヤー，ガスコンロなど，裸火で使用する器具への着火確率を算出した．

店舗の空間体積は，据付ステージ同様，84.7 ㎡×高さ 2.7ｍの 228.7 ㎥として空間的遭遇確率を算出した．また，バックヤード（調理場）の空間体積は，コンビニエンスストアの売場とバックヤードの容積比を考慮し，売場の 1/5 となる 45.63 ㎥とし空間的遭遇確率を計算した．

噴出漏れ確率については，2009 年から 13 年の発生確率平均を参考にし解析を行う．ピット内冷媒配管接続部漏れ時の可燃空間時空積 610.2 ㎥･min に対し，ファン停止時の庫内漏れ時の可燃空間時空積 2103 ㎥･min の方が可燃空間時空積は大きいが，ショーケース内ファンは常時稼動し，エアカーテンが形成されているので，庫内漏れが発生しても可燃域が庫外に拡散されることはない．従って，可燃空間時空積は 610.2 ㎥･min を採用した．

次に，リーチインショーケースのリスク RA を検討した．

扉付きショーケース庫内には着火源がなく，庫内で冷媒が漏えいしても着火するリスクはないが，扉を開ける事で店舗内に可燃域が出来る可能性が有る．そこで，リーチインショーケースについては，庫内へ

の漏えい検知器の設置，及び液配管に安全遮断弁を取り付ける安全対策を行うこととした．

FTA 算出の結果，着火確率は**表 5-4** の結果となり，未対策の場合はオープンショーケースでは許容値である 2.00×10^{-8} を上回る確率であった．リーチインケース庫内漏れでは，許容値を下回る確率であった．オープンショーケースは，許容値を上回る結果となったため，着火確率を低減策として以下を提案した．

なお，リーチインショーケースは未対策であっても許容値を下回る確率であったが，ピット内冷媒配管接続部漏れの場合はオープンショーケースと同じく可燃域が生成されるリスクがあること，ショーケース形状で対策の有無を分けると，必要な対策がなされない場合が発生すると考え，リーチインケースにも対策を行うこととした．

表 5-4　使用ステージの算出結果

冷媒	オープンショーケース	リーチインショーケース庫内漏れ
R32	2.80×10^{-8}	4.11×10^{-10}
R1234yf	5.76×10^{-8}	8.64×10^{-10}

対策１　ファンによる換気の実施

サーキュレートファン取付により，冷媒漏えい時の可燃域生成を防止する．サーキュレートファンを運転した場合は，可燃域ができないので着火リスクがゼロとなるが，サーキュレートファンの故障率を考慮して，リスク低減効果を 1/100 とした．

対策２　冷媒漏えい検知器作動時の対応に関する教育の実施

冷媒漏えい検知器が作動した場合，店舗関係者は速やかに店舗内で使用している燃焼機器等の使用を中止し，換気を行い着火源を排除し保守点検業者に連絡し対策処置に関する教育を行うこととした．これら教育により，リスク低減効果を 1/10 とした．

上記の対策を実施することで，着火確率は**表 5-5** の結果となり，いずれも許容値（2.00×10^{-8}）以下となった．

表 5-5　使用ステージの対策後算出結果

冷媒	オープンショーケース		リーチインショーケース庫内漏れ	
	未対策	対策後	未対策	対策後
R32	2.80×10^{-8}	5.51×10^{-11}	4.11×10^{-10}	8.45×10^{-11}
R1234yf	5.76×10^{-8}	1.09×10^{-10}	8.64×10^{-10}	1.77×10^{-10}

5.3　修理ステージ

店舗に設置されているショーケースの修理作業時における FTA を検討した．ここでは，リスクが高くなると想定されるバーナー使用による修理の検討結果を中心に記述する．ただ，サービスマンが室内での修理作業中に喫煙することについては，確率数値を「0」として算出した．

着火源としては，①ろう付けバーナー　②それ以外（電気スパーク，活線作業）を想定し，冷媒漏えい原因については，ｉ）サービス作業に伴わない冷媒漏えい（配管亀裂による冷媒漏えい等のサービス作業

と関連の無い原因）　ⅱ）バーナーを使って外した配管からの冷媒漏えい（冷媒回収不十分，忘れ）を考慮した.

また，サービス時間は室内機前での作業として 1 時間（部品交換 0.5hr＋リークチェック 0.5hr），ろう付け時間は 8 分（2 分×4 回　部品の取り外しでろう付け 2 回，取り付けで 2 回の合計 4 回），バーナー作業空間を考慮した.

FTA 算出の結果，着火確率は**表 5-6** の結果となり，許容値（2.00×10^{-7}）を超えることとなった．支配的な着火源は冷媒漏えいの修理作業時に使用するろう付けバーナーで，リスクを低減させるには作業中のバーナー取扱いに関して対策を施すことと，冷媒漏えい発生時の可燃域発生量の低減が重要となる．以上を踏まえ，着火確率の低減策として，以下の提案をした.

表 5-6　修理ステージの算出結果

冷媒	オープンショーケース	リーチインショーケース庫内漏れ
R32	8.86×10^{-4}	1.10×10^{-5}
R1234yf	1.86×10^{-3}	2.30×10^{-5}

対策１　バーナーの取扱いと漏えい検知器の携行に関する注意喚起，教育の実施

修理作業時は, 作業者にバーナーの取扱いと携帯形漏えい検知器に関する注意喚起, 教育を実施する.

冷媒漏えい箇所修理のため，ろう付けバーナー使用時に冷媒漏えいに気付いたら直ちにバーナーを消す．また，携帯形漏えい検知器の携行を義務付け，作業前，作業中に冷媒漏えいをチェックし，冷媒漏えいがあった場合は作業を中断する. 漏えい検知器携行によりリスクを 1/100 に低減できるが, 20 回に 1 回程度は携行を忘れるとし，リスク低減は 1/100×19/20+1×1/20 となるため，1/20 とした.

対策２　活線作業での注意喚起，教育の実施

修理作業時は，通電された状態から作業を開始するため，漏電による漏えい冷媒への着火リスクがある. そのため，修理対象の活線作業を禁止し，対象となる電気配線の電源を必ず切ってから作業を行う. 本教育により，活線作業を減らすことができるため，リスク低減効果を 1/10 とした.

対策３　修理作業中のファンによる換気の実施

修理作業中も常時サーキュレートファンやポータブル排風機を使用して可燃域の生成の防止を行う. FTA では, 修理作業者がファン電源を誤って切る可能性を考慮してリスク低減効果を 1/10 とした. なお, サーキュレートファンやポータブル排風機を運転した場合は，可燃域ができないので着火リスクがゼロとなるが，臨時作業者が修理補助を行い，誤って壊す場合を考慮して，リスク低減効果を 1/100 とした.

対策４　リーチインショーケース，ウォークインショーケースの冷媒漏えいの防止

リーチインショーケースやウォークインショーケースでは，密閉された庫内で冷媒漏えいが発生した場合に，ガス配管用の逆止弁と，液配管用の安全遮断弁を装備することで可燃域が生成されない対策とした．別な方法として，液配管用の安全遮断弁で閉止し冷凍機にて冷媒を回収して停止するポンプダウン制御にて可燃域が生成されない対策とした．ガス配管用逆止弁及び液配管用安全遮断弁が作動した場合，庫内に可燃域ができないので着火リスクがゼロとなるが，ガス配管用逆止弁及び液配管用安全遮断弁が故障して作動しない確率を考慮して，リスク低減効果を 1/100 とした.

上記の安全対策を施した場合の着火確率は**表 5-7** の結果となり，いずれも許容値（2.00×10^{-7}）以下となった.

表 5-7　修理ステージの対策後算出結果

冷媒	オープンショーケース		リーチインショーケース庫内漏れ	
	未対策	対策後	未対策	対策後
R32	8.86×10^{-4}	4.43×10^{-8}	1.10×10^{-5}	5.12×10^{-9}
R1234yf	1.86×10^{-3}	9.30×10^{-8}	2.30×10^{-5}	1.08×10^{-8}

5.4　廃棄ステージ

店舗からのショーケースの撤去作業時の FTA を検討した．冷媒漏えい発生確率は，撤去作業に伴わない場合と，撤去に伴う場合に分けて算出した．また着火確率は，以下の 3 つに分けて算出した．

① 解体バーナーによるもの
② バーナー作業や喫煙に伴わない電気スパークや活線作業などによるもの
③ 作業者の喫煙に伴うもの

それぞれの着火確率に冷媒漏えい発生確率を乗じ，さらに年間撤去率を乗じて撤去作業時の冷媒への着火確率を算出した結果，着火確率は**表 5-8** の結果となり，オープンショーケースでは許容値である 2.00×10^{-7} を上回る下表の確率であった．リーチインショーケース庫内漏れでは，許容値を下回る確率であった．

表 5-8　廃棄ステージの算出結果

冷媒	オープンショーケース	リーチインショーケース庫内漏れ
R32	2.81×10^{-6}	4.70×10^{-8}
R1234yf	2.87×10^{-6}	6.83×10^{-8}

そのため，上記の①及び②を中心に，着火源に関してと，冷媒漏えいを検知について以下 3 点の対策を図ることとした．なお，リーチインショーケースは未対策であっても許容値を下回る確率であったが，ピット内冷媒配管接続部漏れの場合はオープンショーケースと同じく可燃域が生成されるリスクがあること，ショーケース形状で対策の有無を分けると，必要な対策がなされない場合が発生すると考え，リーチインケースにも対策を行うこととした．

対策 1　バーナーの取扱いと漏えい検知器の携行に関する注意喚起，教育の実施

廃棄作業時は，作業者にバーナーの取扱いと携帯形漏えい検知器に関する注意喚起，教育を実施する．

冷媒漏えい箇所修理のため，ろう付けバーナー使用時に冷媒漏えいに気付いたら直ちにバーナーを消す．また，携帯形漏えい検知器の携行を義務付け，作業前，作業中に冷媒漏えいをチェックし，冷媒漏えいがあった場合は作業を中断する．漏えい検知器携行によりリスクを 1/100 に低減できるが，20 回に 1 回程度は携行を忘れるとし，リスク低減は 1/100×19/20+1×1/20 となるため，1/20 とした．

対策 2　活線作業での注意喚起・教育の実施

撤去作業時には電気配線の活線作業を禁止する．本教育により，活線作業を減らすことができるため，リスク低減効果を 1/10 とした．

上記の安全対策を施した場合の着火確率は**表 5-9** の結果となり，いずれも許容値（2.00×10^{-7}）以下となった.

表 5-9　廃棄ステージの対策後算出結果

冷媒	オープンショーケース		リーチインショーケース庫内漏れ	
	未対策	対策後	未対策	対策後
R32	2.81×10^{-6}	1.52×10^{-8}	4.70×10^{-8}	2.53×10^{-10}
R1234yf	2.87×10^{-6}	1.63×10^{-8}	6.83×10^{-8}	3.78×10^{-10}

6. コンデンシングユニットのリスクアセスメント結果と安全対策

コンデンシングユニットは，店舗用パッケージエアコン，ビル用マルチエアコンと同じ設置形態となる．従って，FTA は，凝縮器ファン横吹きタイプは店舗用パッケージエアコン[6-1)]を，凝縮器ファン上吹きタイプはビル用マルチエアコン[3-1)]を参考に作成した．本報告書に記載のない内容については，それぞれの報告書を参考されたい．

6.1 据付ステージ

6.1.1 FTA の構成

コンデンシングユニットの形態は横吹きタイプと上吹きタイプがあり，設置環境や作業内容が店舗用パッケージエアコン，ビル用マルチエアコンの室外機と同様であることから，FTA の構成はそれぞれの室外機部分を流用した．

着火源として配管接続時のろう付けバーナー，試運転時の電気系スパーク，燃焼機器，作業者の喫煙を想定している．また，冷媒漏えい要因は，配管の接続ミスや液出口バルブ誤操作等のヒューマンエラー，接続配管やバルブの部品不良などを想定している．

6.1.2 各々の確率数値

据付頻度については，小形店舗向けの市場ストック台数 14 万 6 千台に占める年間出荷台数の割合とした．出荷台数は日冷工の 2009～2013 年統計をもとに下表のように算出した．

表 6-1 コンデンシングユニットの年間出荷台数

年度	全密閉		半密閉＋ｽｸﾛｰﾙ	
	屋外	屋内	屋外	屋内
2009（H21）	11,066	42,782	21,985	4,994
2010（H22）	12,567	48,141	24,548	5,410
2011（H23）	11,845	53,854	27,330	4,687
2012（H24）	16,234	35,372	34,343	5,489
2013（H25）	16,533	36,319	33,332	4,835
年平均	13,649	43,294	28,308	5,083
小形店舗向け	（全密閉：39%）		（半密閉：18%）	
	5,323	16,885	5,095	915
合計	28,218			

ヒューマンエラー発生率は 2.5 項に示す 10^{-3}，運転時冷媒漏えい発生確率としては**表 2-7** に示す「噴出漏れ，急速漏れ」の数値を使用した．また，電気系スパークの存在確率について，事故件数に対する存在台数は 14 万 6 千台として計算した．

6.1.3 着火確率と安全対策

横吹きタイプの FTA 算出の結果，着火確率は**表 6-2** のとおり，「半地下」設置で許容値（6.9×10^{-7}）を

上回る結果となった．ろう付け作業時のバーナーによる着火確率が比較的高いため，店舗用パッケージエアコンと同様に，低減策としてろう付け時の「携帯形冷媒漏えい検知器の携行による漏れ検査」と据付全般についての「作業者への教育」を実施する．ショーケースでも実施しているように，作業時は常時，携帯形冷媒漏えい検知器を携行し，漏れ検査によりリスクを 1/100 に低減できるが，20 回に 1 回程度は携行を忘れるとし，リスク低減は 1/100×19/20+1×1/20 となるため，1/20 とした．また，教育によるリスク低減効果は 1/10 とした．これらの対策により着火確率は許容値（6.9×10^{-7}）以下となった．

表 6-2　据付ステージの算出結果（横吹きタイプ・店舗用パッケージエアコン FTA（第三次）ベース）

設置場所	冷媒			
	R32（19kg）		R1234yf（19kg）	
	未対策	対策後	未対策	対策後
通常設置	2.15×10^{-9}	対策不要	2.33×10^{-9}	対策不要
各階設置	3.61×10^{-9}	対策不要	4.21×10^{-9}	対策不要
半地下設置	2.66×10^{-6}	2.00×10^{-8}（※1）	2.68×10^{-6}	2.19×10^{-8}（※1）
狭小設置	2.86×10^{-8}	対策不要	4.13×10^{-8}	対策不要
※1　店舗用パッケージエアコンと同様の対策を実施する．				

上吹きタイプの場合，ビル用マルチエアコンでは「半地下」「機械室」設置で安全対策が必要となったが，コンデンシングユニットでは**表 6-3** のとおり，未対策でも許容値以下となった．これは市場ストック台数が少ないため着火確率許容値がエアコンと比べ高いことによるものであるが，実際の現場で製品別に対策要否を分けると必要な対策が実施されない場合が懸念されるため，ビル用マルチエアコンと同様の安全対策を実施することとした．

表 6-3　据付ステージの算出結果（上吹きタイプ・ビル用マルチエアコン FTA ベース）

設置場所	冷媒			
	R32（26.3kg）		R1234yf（26.3kg）	
	未対策	対策後	未対策	対策後
通常設置	4.58×10^{-8}	対策不要	4.58×10^{-8}	対策不要
各階設置	4.75×10^{-8}	対策不要	4.75×10^{-8}	対策不要
半地下設置	2.79×10^{-7}	対策要（※2）	2.79×10^{-7}	対策要（※2）
機械室設置	2.87×10^{-7}	対策要（※2）	2.88×10^{-7}	対策要（※2）
※2　ビル用マルチエアコンと同様の対策を実施する．				

6.2　使用ステージ

6.2.1　FTA の構成

前述のとおり，別置ショーケースに接続されるコンデンシングユニットは，横吹きタイプと上吹きタイプがあり，それぞれ設置環境や使用環境が店舗用パッケージエアコン，ビル用マルチエアコンと同様であることから，各エアコンFTAの構成を流用し，コンデンシングユニットの市場ストック台数（小形

店舗納め：14万6千台），冷媒漏えい発生確率（噴出漏れ（3.34×10^{-5}）と急速漏れ（1.10×10^{-3}）の加算），運転率（ON：80.9%／OFF：19.1%・当工業会調べ）の数値を置き換え，着火確率を算出した．また使用ステージの許容値は，6.9×10^{-8}以下とした．

6.2.2　着火確率と安全対策

FTA 算出の着火確率を**表 6-4**，**表 6-5** に示す．横吹きタイプは，店舗用パッケージエアコン同様「半地下」設置において，また上吹きタイプはビル用マルチエアコン同様「半地下」「機械室」設置において許容値（6.9×10^{-8}）を上回る結果となったが，それぞれベースとなるエアコンと同じ対策を織込むことによって，着火確率は許容値以下になった．このことからコンデンシングユニットの安全対策も店舗用パッケージエアコン，ビル用マルチエアコン同様の対策が有効であると判断できた．

なお，横吹きタイプの「狭小」設置は，着火確率は許容値以下となったが，実際の現場で製品別に対策要否を分けると必要な対策が実施されない場合が懸念されるため，店舗用パッケージエアコンと同様の安全対策を実施することとした．

表 6-4　使用ステージの算出結果（横吹きタイプ・店舗用パッケージエアコンFTA（第三次）ベース）

設置場所	冷媒			
	R32（19kg）		R1234yf（19kg）	
	未対策	対策後	未対策	対策後
通常設置	5.47×10^{-11}	対策不要	6.21×10^{-11}	対策不要
各階設置	1.29×10^{-10}	対策不要	1.49×10^{-10}	対策不要
半地下設置	9.73×10^{-7}	2.39×10^{-10}（※1）	2.03×10^{-6}	5.02×10^{-10}（※1）
狭小設置	1.78×10^{-9}	対策要（※1）	2.41×10^{-9}	対策要（※1）
※1　店舗用パッケージエアコンと同様の対策を実施する．				

表 6-5　使用ステージの算出結果（上吹きタイプ・ビル用マルチエアコンFTAベース）

設置場所	冷媒			
	R32（26.3kg）		R1234yf（26.3kg）	
	未対策	対策後	未対策	対策後
通常設置	4.37×10^{-12}	対策不要	4.93×10^{-12}	対策不要
各階設置	7.05×10^{-10}	対策不要	7.96×10^{-10}	対策不要
半地下設置	3.64×10^{-7}	7.56×10^{-10}（※2）	7.48×10^{-7}	1.02×10^{-9}（※2）
機械室設置	対策必要	2.59×10^{-10}（※2）	対策必要	2.93×10^{-10}（※2）
※2　ビル用マルチエアコンと同様の対策を実施する．				

なお，今回織込んだ安全対策は下記のとおりである．（詳細は，店舗用パッケージエアコンのリスク評価報告書 [6-1)]（6.4.3 使用（室外）ステージの安全対策），ビル用マルチエアコンのリスク評価報告書 [3-1)]（4.4.4 安全対策）による）

(1)半地下設置

店舗用パッケージエアコン，ビル用マルチエアコンの半地下設置安全対策は，**表 6-6** のとおりである．

表 6-6　半地下設置の安全対策

	店舗用パッケージ（横吹きタイプ）		ビル用マルチ（上吹きタイプ）	
冷媒量(M)［kg］	M≦1/2×LFL×熱交上端高さ×床面積	M＞1/2×LFL×熱交上端高さ×床面積	M≦1/2×LFL×熱交上端高さ×床面積	M＞1/2×LFL×熱交上端高さ×床面積
半地下高さ 1.2m 以下	不要	不要	不要	不要
半地下高さ 1.2m 超 2m 以下	不要	①冷媒漏えいｾﾝｻｰ検知時に横吹室外ﾌｧﾝ強制 ON　（最小風速：4m/s　かつ　室外機吹出側から壁面までの距離：3m 以下）または，②局所強制排気装置	不要	冷漏洩えいｾﾝｻｰ検知時に上吹室外ファン強制 ON（最小風速：2.6m/s）
半地下高さ 2m 超 3.3m 以下	不要	局所強制排気装置	不要	冷漏洩えいｾﾝｻｰ検知時に上吹室外ファン強制 ON（最小風速：2.6m/s）
半地下高さ 3.3m 超	不要	設置禁止	不要	設置禁止

(2)狭小設置

狭小設置に対しては，「最低 1 面 0.6ｍの人がアクセスできる通路を確保」を条件にしている．安全対策ケースを**図 6-1** に示す．

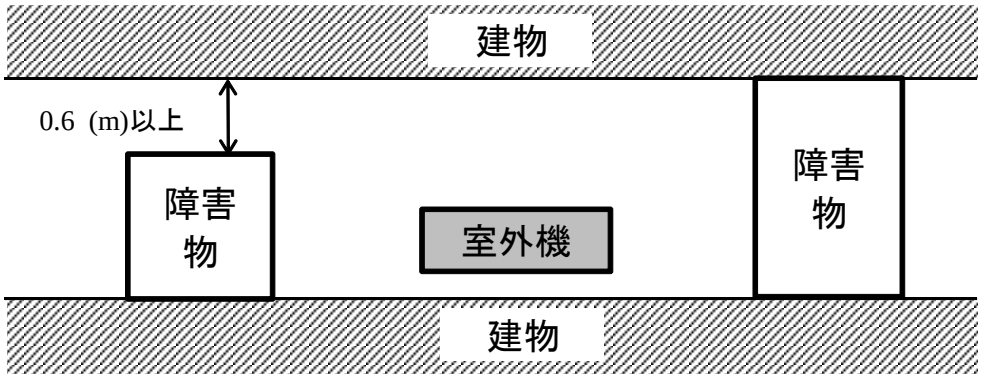


図 6-1　狭小設置の安全対策ケース

(3)機械室設置

機械室設置の安全対策は，式(6.1)による．

$$n=75/(0.642\times LFL\times V) \qquad \cdots\cdots\cdots\cdots(6.1)$$

ここに，　n　：　必要換気回数（回/h）

V　：　部屋の容積（m^3）

注）換気機器は 2 基設置のこと

6.3　修理ステージ

6.3.1　FTA の構成

別置ショーケースに接続されるコンデンシングユニットの修理時における FTA を検討した．前述の各ステージと同様に，横吹きタイプと上吹きタイプをそれぞれ店舗用パッケージエアコンとビル用マルチエアコンの室外機部分の FTA をベースに作成した．

6.3.2　着火確率と安全対策

横吹きタイプは，店舗用パッケージエアコンの修理時 FTA をベースに，市場ストック台数，冷媒漏えい発生確率をコンデンシングユニットの数値に置き換え，FTA を作成し着火確率を算出した．FTA 算出の結果，着火確率は**表 6-7** の結果となり，各設置場所の着火確率は，修理時の許容値（6.90×10^{-7}）以下となった．なお，横吹きタイプの「半地下」「狭小」設置は，着火確率は許容値以下となったが，実際の現場で製品別に対策要否を分けると必要な対策が実施されない場合が懸念されるため，店舗用パッケージエアコンと同様の安全対策を実施することとした．

表 6-7　修理ステージの算出結果（横吹きタイプ・店舗用パッケージエアコン FTA（第三次）ベース）

設置場所	冷　　媒			
	R32（19kg）		R1234yf（19kg）	
	未対策	対策後	未対策	対策後
通常設置	5.53×10^{-10}	対策不要	1.57×10^{-9}	対策不要
各階設置	1.47×10^{-9}	対策不要	3.71×10^{-9}	対策不要
半地下設置	1.26×10^{-7}	対策要（※1）	1.82×10^{-7}	対策要（※1）
狭小設置	1.91×10^{-8}	対策要（※1）	2.79×10^{-8}	対策要（※1）
※1　店舗用パッケージエアコンと同様の対策を実施する．				

上吹きタイプは，ビル用マルチエアコンの修理時 FTA をベースに，市場ストック台数，冷媒漏えい発生確率，ヒューマンエラーをコンデンシングユニットの数値に置き換え，コンデンシングユニットでは実施していない連結設置を削除して FTA を作成し着火確率を算出した．FTA 算出の結果，着火確率は**表 6-8** の結果となり，「半地下」「機械室」設置の場合，修理時の許容値（6.90×10^{-7}）を超えることとなった．対策として，ビル用マルチエアコン同様に以下の安全対策を織込むことにより，修理時の許容値（6.90×10^{-7}）以下となった．

表 6-8　修理ステージの算出結果（上吹きタイプ・ビル用マルチエアコン FTA ベース）

設置場所	冷　　媒			
	R32（26.3kg）		R1234yf（26.3kg）	
	未対策	対策後	未対策	対策後
通常設置	1.08×10^{-8}	対策不要	1.54×10^{-8}	対策不要
各階設置	2.51×10^{-8}	対策不要	3.72×10^{-8}	対策不要
半地下設置	2.23×10^{-6}	2.12×10^{-7}（※2）	3.32×10^{-6}	4.40×10^{-7}（※2）
機械室設置	5.41×10^{-6}	5.17×10^{-7}（※2）	7.93×10^{-6}	5.71×10^{-8}（※2）
※2　ビル用マルチエアコンと同様の対策を実施する．				

対策１　サービスマンに対する教育訓練の実施

修理作業中に冷媒漏えいを検知したら，作業を中断する，換気をする，燃焼機器を止める等の教育訓練を実施する．本教育により，作業者の意識向上を行い，リスク低減効果を 1/10 とした．

対策２　冷媒漏えい検知器の携行

冷媒漏えい検知器の携行を義務付け，作業前，作業中に冷媒漏えいのチェックを行い，冷媒漏えいがあった場合は作業を中断する．漏えい検知器の携行によりリスクを 1/100 に低減できるが，20 回に 1 回程度は携行を忘れるとし，リスク低減は 1/100×19/20+1×1/20 となるため，1/20 とした．

対策３　換気機器の設置

R1234yf の機械室設置の場合，上記の安全対策だけでは許容値（6.90×10^{-7}）を超えるため，換気機器の設置を追加する．上吹きタイプはビル用マルチエアコンをベースに設計され，設置環境も同様であることから，下記のとおりビル用マルチエアコンと同一の換気量とした．なお，実際の現場で冷媒別に対策要否を分けると必要な対策が実施されない場合が懸念されるため，R32 も同様の安全対策を実施することとした．なお，安全対策は，6.2.2(3)機械室設置の式(6.1)による．

6.4　廃棄ステージ

6.4.1　FTA の構成

別置ショーケースに接続されるコンデンシングユニットの撤去作業時における FTA を検討した．前述の各ステージと同様に，横吹きタイプと上吹きタイプをそれぞれ店舗用パッケージエアコンとビル用マルチエアコンの FTA をベースに作成した．

6.4.2　着火確率と安全対策

横吹きタイプは，店舗用パッケージエアコンの廃棄時 FTA をベースに，市場ストック台数，冷媒漏えい発生確率をコンデンシングユニットの数値に置き換え，FTA を作成し着火確率を算出した．FTA 算出の結果，着火確率は**表 6-9** の結果となり，各設置場所の着火確率は，廃棄時の許容値（6.90×10^{-7}）以下となった．なお，横吹きタイプの「半地下」設置は，着火確率は許容値以下となったが，実際の現場で製品別に対策要否を分けると必要な対策が実施されない場合が懸念されるため，店舗用パッケージエアコンと同様の安全対策を実施することとした．

表 6-9　廃棄ステージの算出結果（横吹きタイプ・店舗用パッケージエアコン FTA（第三次）ベース）

設置場所	冷　　媒			
	R32（19kg）		R1234yf（19kg）	
	未対策	対策後	未対策	対策後
通常設置	4.15×10^{-9}	対策不要	1.50×10^{-9}	対策不要
各階設置	1.21×10^{-8}	対策不要	8.24×10^{-7}	対策不要
半地下設置	3.47×10^{-7}	対策要（※1）	1.80×10^{-8}	対策要（※1）
狭小設置	1.29×10^{-7}	対策不要	1.84×10^{-7}	対策不要
※1　横吹きタイプと同様の対策を実施する．				

上吹きタイプは，ビル用マルチエアコンの廃棄時 FTA をベースに，市場ストック台数，冷媒漏えい発生確率，ヒューマンエラーをコンデンシングユニットの数値に置き換え，コンデンシングユニットでは実施していない連結設置を削除して FTA を作成し着火確率を算出した．FTA 算出の結果，着火確率は**表 6-10** の結果となり，「半地下」「機械室」設置の場合，修理時の許容値（6.90×10^{-7}）を超えることとなった．対策として，ビル用マルチエアコン同様に以下の安全対策を織込むことにより，廃棄時の許容値（6.90×10^{-7}）以下となった．

表 6-10　廃棄ステージの算出結果（上吹きタイプ・ビル用マルチエアコン FTA ベース）

設置場所	冷　　媒			
	R32（26.3kg）		R1234yf（26.3kg）	
	未対策	対策後	未対策	対策後
通常設置	1.0×10^{-8}	対策不要	1.4×10^{-8}	対策不要
各階設置	4.1×10^{-8}	対策不要	5.5×10^{-8}	対策不要
半地下設置	1.7×10^{-6}	1.0×10^{-8}（※2）	1.7×10^{-6}	1.2×10^{-8}（※2）
機械室設置	1.7×10^{-6}	1.2×10^{-8}（※2）	1.7×10^{-6}	1.4×10^{-8}（※2）
※2　ビル用マルチエアコンと同様の対策を実施する．				

対策１　サービスマンに対する教育訓練の実施

撤去作業中に冷媒漏えいを検知したら，作業を中断する，換気をする，燃焼機器を止める等の教育訓練を実施する．本教育により，作業者の意識向上を行い，リスク低減効果を 1/10 とした．

対策２　冷媒漏えい検知器の携行

冷媒漏えい検知器の携行を義務付け，作業前，作業中に冷媒漏えいのチェックを行い，冷媒漏えいがあった場合は作業を中断する．漏えい検知器の携行によりリスクを 1/100 に低減できるが，20 回に 1 回程度は携行を忘れるとし，リスク低減は 1/100×19/20+1×1/20 となるため，1/20 とした．

7. 国内規制改革の経緯

7.1 はじめに

2013 年 6 月 14 日の内閣府の規制改革会議に，冷凍空調機器への新冷媒の使用基準の整備についての以下の答申がなされた [7-1)].

“冷凍空調機器に使用される冷媒のうち，現在広く使用されている R404A 等は，冷凍保安規則第２条において「不活性ガス」として限定列挙されている．「不活性ガス」に分類されている冷媒を使用して冷凍空調機器を製造する事業場においては，その他の冷媒を使用する工場に比べて，冷凍保安責任者の配置義務，定期自主検査の実施義務などの要件が緩和されている．一方，R404A 等の冷媒は，地球温暖化に与える影響が大きいことから，より影響の小さい R32 等のいわゆる「新冷媒候補」が注目されている．しかし，R32 等は「不活性ガス」に分類されていない「その他の冷媒」であることから，R404 等に比べて各種義務等の負担が大きく，コスト高となることから，その普及が阻害されている．したがって，現在主に使われている冷媒に比べて，地球温暖化に対する影響が小さい R32 等のガスについて，冷凍空調機器の冷媒として円滑に使用できるよう，技術的事項について検討し，検討を踏まえ利用に伴う条件の緩和や適用除外の措置を講じることについて検討し，結論を得る．”

そして，この方針が承認され，平成 25 年度検討開始，平成 25 年度以降平成 27 年度までに順次結論，結論を得次第順次措置，とされた [7-2)].

これを受けて，経済産業省は R32，R1234yf 及び R1234ze(E)の 3 つの冷媒の規制緩和について，3 ヶ年計画の委託事業を行い，高圧ガス保安協会がこれを受託し，「冷凍保安規則関連の冷凍機等への可燃性冷媒再充塡の安全性評価委員会」（委員長：東京大学 大学院新領域創成科学研究科人間環境学専攻 教授 飛原英治）を立ち上げ，検討を行った．具体的には，1 年目の 2013 年度は，海外における冷凍設備の規制体系調査，ASHRAE 及び ISO における冷媒の分類方法についての調査等を行い [7-3)]，2 年目の 2014 年度は，高圧ガス保安法での規制のあり方についての具体的な検討を行い [7-4)]，3 年目の 2015 年度は，最終的な検討のまとめを行い，法規制緩和の方針を決定した [7-5)].

そこで，日冷工では，2014 年 6 月に，各社からの代表者と知見者として微燃性冷媒安全性検討 WG の各機器の SWG 主査で構成される規制改革対応 WG を立ち上げ，高圧ガス保安協会及び経済産業省と共に，高圧ガス保安法の規制緩和についての具体的な検討を進め，規制緩和に至った．その具体的な検討内容について，説明する．

7.2　高圧ガス保安法の体系及び従来の高圧ガス保安法での冷媒の区分

7.2.1　高圧ガス保安法の体系

高圧ガス保安法の体系図を**図 7-1** に示す．最上位の法である高圧ガス保安法の改正には国会承認，政令である高圧ガス保安法施行令の改正には閣議決定，省令である一般高圧ガス保安法，冷凍保安規則，容器保安規則等及びそれらよりも下位の告示や例示基準の改正は経済産業省内の決定のみで行うことが可能である．

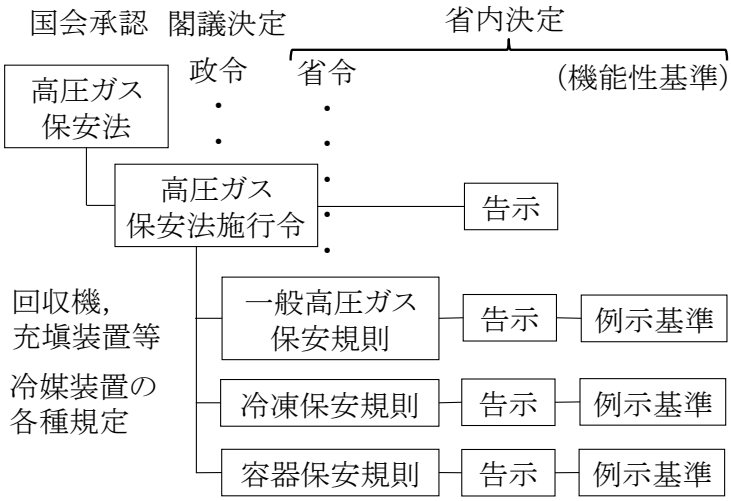


図 7-1　高圧ガス保安法の体系図

7.2.2　従来の高圧ガス保安法での微燃性冷媒の位置づけ

冷凍保安規則では, 冷媒名を不活性ガス, 可燃性ガス, 毒性ガスに掲名する方式（**表 7-1**）であり，R32, R1234yf 及び R1234ze(E)等の微燃性冷媒はどこにも掲名されていなかったため“フルオロカーボン（不活性以外）”という位置づけであった．

一方，一般高圧ガス保安規則では，次のいずれかに該当するものが可燃性ガスに区分される．

(a) 爆発下限界 10%以下

(b) 爆発限界の上限と下限の差が 20%以上

可燃性ガスに区分されていないフルオロカーボンは不活性ガスに区分される規定になっており，微燃性冷媒に関しては，R32 が不活性ガス，R1234yf 及び R1234ze(E)が可燃性ガスに区分されていた．

表 7-1　冷凍保安規則における冷媒の区分

区分	適用除外	その他製造	第二種製造者	第一種製造者
<Group 1> フルオロカーボン (不活性)	5未満	5～20	20～50	50以上
<Group 2> フルオロカーボン (不活性以外)	3未満	3～5	5～50	50以上
<Group 3> 可燃性ガス, CO_2等	3未満	－	3～20	20以上

（単位:(法定)冷凍能力(トン)）

7.3　高圧ガス保安法の改正内容

7.3.1　基本方針

2013～2015 年度の 3 年間の検討の結果，R32，R1234yf 及び R1234ze(E)の 3 つの冷媒を冷凍保安規則で不活性ガスに掲名することが決定された．しかし，わずかな燃焼性があるため，冷凍保安規則において，以下が義務付けられることになった [7-5]．

a) 冷媒が滞留しないような構造

b) 検知警報設備の設置

7.3.2　一般高圧ガス保安規則の改正内容

2016 年 2 月 26 日に，一般高圧ガス保安規則で可燃性ガスに区分されていた R1234yf 及び R1234ze の充塡装置に関する告示 [7-6] が施行され，2016 年 11 月 1 日に改正された [7-7]．この告示は三要件が元になっており，この三要件の適用を前提に，一般高圧ガス保安規則でも冷凍保安規則と同様に，R32，R1234yf 及び R1234ze を不活性ガスに掲名することになった．三要件を以下に示す．なお，次の詳細内容は告示におけるものである．

(1) 換気設備の設置

製造設備には，漏えいしたガスの滞留を防止するための措置を講ずるとともに，特定不活性ガスを製造する際には，十分に換気すること．

(2) 火気を使用しない

製造設備から漏えいしたガスの濃度が爆発限界の下限の 25%以上となる可能性がある区域内では，電線と電気器具とを完全に接続し，かつ，火花を発する機械器具，工具，履物等を使用しないこと．

(3) 検知警報装置の設置

製造設備からのガスの漏えいを検知し，当該ガスの濃度が爆発限界の下限の 12.5%以上に達した場合に警報するための設備を設けること．また，当該ガスの濃度が爆発限界の下限の 25%以上に達した場合に当該製造設備の運転を自動的に停止するための装置を設置すること．

7.3.3　冷凍保安規則の改正内容

冷凍保安規則での主な改正内容 [7-8]を以下に記す（アンダーラインが改正箇所）．

7.3.3.1　冷媒の掲名

第二条で R32，R1234yf，R1234ze が不活性ガス及び特定不活性ガス（新区分）に掲名された．特定不活性ガスは現時点では R32，R1234yf，R1234ze のみである．

7.3.3.2　第一種製造者に係る技術上の基準

第七条第 1 項第三号及び第十五号に特定不活性ガスが掲名され，特定不活性ガスを使用する第一種製造者には，滞留しないような構造と検知警報設備の設置が義務付けられることになった．

第七条　製造のための施設（以下「製造施設」という．）であつて，その製造設備が定置式製造設備（認定指定設備を除く．）であるものにおける法第八条第一号 の経済産業省令で定める技術上の基準は，次の各号に掲げるものとする．

一～二　（略）

三　圧縮機，油分離器，凝縮器若しくは受液器又はこれらの間の配管（可燃性ガス，毒性ガス又は特定不活性ガスの製造設備のものに限る.）を設置する室は，冷媒ガスが漏えいしたとき滞留しないような構造とすること.

四～十四　（略）

十五　可燃性ガス，毒性ガス又は特定不活性ガスの製造施設には，当該施設から漏えいするガスが滞留するおそれのある場所に，当該ガスの漏えいを検知し，かつ，警報するための設備を設けること.

十六～十七　（略）

7.3.3.3　第二種製造者に係る技術上の基準

第十二条第 1 項には第七条第 1 項第三号及び第十五号の基準への適合が規定されており，特定不活性ガスを使用する第二種製造者にも滞留しないような構造と検知警報設備の設置が義務付けられることになった.

7.3.3.4　その他製造に係る技術上の基準

第十五条第 1 項第二号に新たな条文が追記され，特定不活性ガスを使用するその他製造にあっては，燃焼を防止するための措置を講ずることが義務付けられることになった.

第十五条

一　（略）

二　特定不活性ガスを冷媒ガスとする冷凍設備にあつては，冷媒ガスが漏えいしたときに燃焼を防止するための適切な措置を講ずること.

7.3.4　冷凍保安規則関係例示基準の改正内容

冷凍保安規則関係例示基準の主な改正内容[7-9)]を以下に記す（アンダーラインが改正箇所）.

7.3.4.1　第一種製造者及び第二種製造者

7.3.4.1.1　滞留しないような構造

冷凍保安規則関係例示基準 3（滞留しないような構造）が改正され，特定不活性ガスを使用する製造設備では，一時間当たり 380 を室の相当容積（単位 m^3）で除した回数以上の換気能力を有する機械通風装置の設置が規定された.

3. 滞留しないような構造（関係条項：第七条第 1 項第三号，第十二条第 1 項）

可燃性ガス，毒性ガス又は特定不活性ガスを冷媒ガスとする冷媒設備の圧縮機，油分離器，凝縮器若しくは受液器又はこれらの間の配管を設置する室における漏えいした冷媒ガスが滞留しないような構造は，次のいずれかに掲げる基準に適合することとする.

(1)・(2)　（略）

(3) 特定不活性ガスを冷媒ガスとする場合においては，一時間当たり 380 を当該室の相当容積（単位 m^3）で除した回数以上の換気能力を有し，直接外気に給排気を行う機械通風装置を設置し，当該室の上部に給気口を設け，床面近くに排気口を設けること．相当容積は当該室の床面積に床面から給気口までの高さを乗じて得られる値とする．この場合，機械通風装置は，当該室の内部及び外部の

いずれにおいても始動及び停止ができるものであること．

7.3.4.1.2　ガス漏えい検知警報設備とその設置場所

例示基準（13. ガス漏えい検知警報設備とその設置場所）が改正され，特定不活性ガスを使用する製造設備では，滞留しやすい場所に検知警報設備を設置することが規定された．特定不活性ガスにあっては，機械室内の設備群を長方形で囲ったときに，その面積が 290m^2 以下では滞留しやすい場所に 1 個設置すればよい．

13. ガス漏えい検知警報設備とその設置場所（関係条項：第 7 条第 1 項第 15 号，第 12 条第 1 項）

（機能）

13.1 ガス漏えい検知警報設備（以下単に「検知警報設備」という．）は，可燃性ガス，毒性ガス又は特定不活性ガスの漏えいを検知した上，その濃度を指示するとともに警報を発するものとし，次の各号の性能を有するものとする．

(2) 警報設定値は，設置場所における周囲の雰囲気の温度において，可燃性ガス又は特定不活性ガスにあっては爆発下限界の 1/4 以下の値，毒性ガス用にあっては許容濃度値以下とすること．ただし，アンモニアを使用する場合にあっては，50ppm 以下とする．

(3) 警報精度は，警報設定値に対し，可燃性ガス用又は特定不活性ガス用にあっては±25%以下，毒性ガス用にあっては±30%以下のものであること．

(4)～(5)　（略）

(6) 指示計の目盛については，可燃性ガス用又は特定不活性ガス用にあっては 0～爆発下限界値（警報設定値を低濃度に設定するものにあっては，当該警報設定値を勘案し，爆発下限界値以下の適切な値とすることができる．），毒性ガス用にあっては 0～許容濃度値の 3 倍の値（アンモニアを使用する場合にあっては 400ppm．ただし，50ppm で警告音を発する場合は 150ppm．）をそれぞれの目盛の範囲に明確に指示するものであること．なお，特定不活性ガス用にあっては，警報設定値及び漏えいしたガスの検知濃度を外部に電気信号等で出力できる構造のものであれば，指示計の設置を省略することができる．

(7)～(8)　（略）

(9) 検知警報設備は，1 月に 1 回以上その警報に係る回路検査により警報を発すること及び 1 年に 1 回以上その検知及び警報に係る検査を行い正常に作動することを確認すること．

（構造）

13.2　（略）

（設置個所）

13.3 検知警報設備の設置は，次の各号によるものとする．

13.3.1 製造施設における検知警報設備の検出端部の設置場所及び個数は，次の各号によるものとする．

(1) 建物の中に設置されている冷媒設備に係る圧縮機，ポンプ，凝縮器，高圧受液器，低圧受液器等の設備等の設備群（以下「設備群」という．）が設置してある場所の周囲であって漏えいしたガスが滞留しやすい場所に，設備群の周囲 10m につき 1 個以上の割合で計算した個数とする．

　ただし，設置個数については，機械室内に設置された設備群の周囲を一つの長方形で囲ったときに，その面積（以下「設備群面積」という．）で当該機械室の床面積を除した値が 1.8 以上である場

合には設備群面積に応じ，可燃性ガス用又は毒性ガス用にあっては，次表の中欄の設置個数とすることができ，特定不活性ガス用にあっては，同表の下欄の最低設置個数とすることができる．

表 7-2　検知警報設備の設置個数

設備群面積 S(m^2)	0＜S≦30	30＜S≦70	70＜S≦130	130＜S≦200	200＜S≦290
設置個数	2	3	4	5	6
最低設置個数	1	1	1	1	1

(2)　（略）

(3) 可燃性ガス用又は毒性ガス用にあっては，建物の外に設置されている設備群が他の冷媒設備，壁その他の構造物に接近している場合，漏えいしたガスが滞留する恐れのある場所に，その設備群の周囲 20m につき 1 個以上の割合で計算した数とする．

7.3.4.2　その他製造

その他製造に対しては，例示基準は作成せず，その代わりに，日冷工で作成したガイドライン（JRA GL-20）をファスト・トラック制度 [7-10]で審議・登録し，例示基準相当の基準として運用することになった．

ファスト・トラック制度は，民間の規格を活用するための新しい制度であり，申請者は高圧ガス保安協会に，次の①及び②に掲げる資料が添付された事前評価申請書を提出する．

①適合性評価において適用する詳細基準

②①に掲げる詳細基準が機能性基準に適合することを証する資料（例えば，安全性を立証するための論文，規格，解析結果及び試験データ）

高圧ガス保安協会は，学識経験者からなる詳細基準事前評価委員会を開催し，その内容について審議し，機能性基準に適合すると認める時は，例示基準相当の規格として登録され，KHK のホームページで公開され，その後 5 年を目途に例示基準化が検討される．

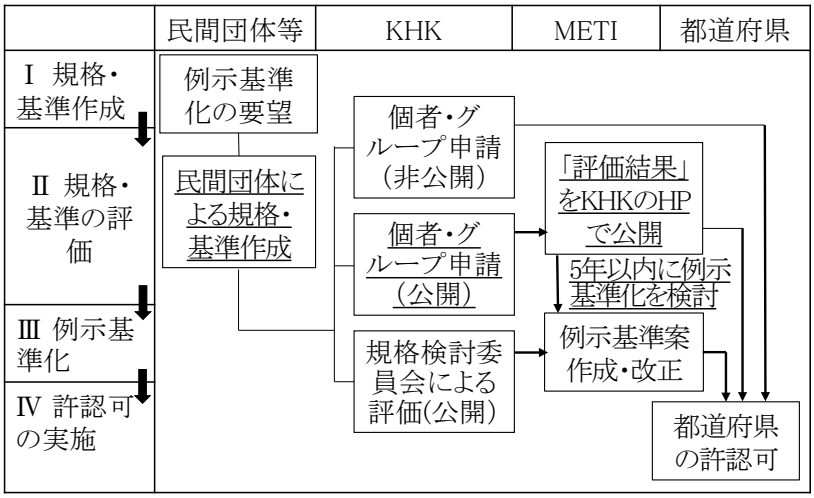


図 7-2　ファスト・トラック制度の体系図

7.3.5　JRA GL-20

JRA GL-20 は，“特定不活性ガスを使用した冷媒設備の冷媒ガスが漏えいしたときの燃焼を防止するための適切な措置”と題したガイドラインで，特定不活性ガスを使用する冷媒設備のうち，法定冷凍能力 5 トン以上 20 トン未満の高圧ガス製造者（その他製造）が保有する冷媒設備に関して，冷媒ガスが漏えいしたときに燃焼を防止して機器を安全に運用するための方法を規定している．

冷媒が漏えいしたときの燃焼を防止するための適切な措置は，以下の 4 つの措置のうちの一つの基準に適合しなければならない（**図 7-3**）．

①冷媒量の制限 ・・・漏えい高さを基準にして，冷媒量を LFL の 1/4 の量に制限する

②かくはん装置の設置・・・設置形態に応じた適切な風量及び風速のかくはん装置を設置し，かくはん後のかくはん高さを基準にして，冷媒量を LFL の 1/4 の量に制限する

③機械通風装置の設置・・・設置形態に応じた適切な換気回数の機械通風装置を設置する

④遮断装置の設置・・・室の外に適切な仕様の遮断装置を設置する

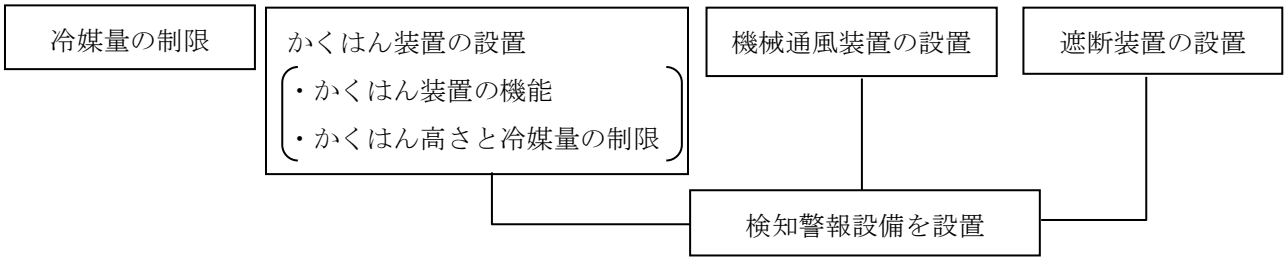


図 7-3　燃焼を防止するための適切な措置

JRA GL-20 は，微燃性冷媒を使った各機器（業務用空調機，設備用エアコン，低温機器及びチラー）の規格及びガイドラインをまとめたものであり，高圧ガス保安協会の委員会で審議，登録され，冷凍保安規則のその他製造に関する例示基準に相当するものとして運用される予定である．

8. まとめ

小形店舗内に設置される微燃性（A2L）冷媒を使用した別置ショーケース及びコンデンシングユニットの RA を 100 年に一度の重大事故が発生する確率が許容できるレベルとして，据付・使用・修理・廃棄の各ステージで行った．

多段形オープンショーケース，平形ショーケース等のオープンショーケースは，ピット内冷媒配管接続部漏れ及び庫内漏れにおいて，何も安全対策を行わない場合は全ステージでリスク許容値以下とできなかったが，冷媒漏えいを検知する漏えい検知器の設置と，漏えいを検知した際に冷媒を拡散する送風機（サーキュレートファン）を安全対策として設置することでリスクを許容値以下とすることができた．

リーチインショーケース，ウォークインショーケース等のクローズドショーケースについては，庫内が扉で密閉されるため，庫内で冷媒が漏えいした場合に可燃域が生成され，扉を開けた際に店舗内に可燃域が広がる恐れがある．そこで，庫内に漏えい検知器を設け，漏えい時は遮断弁を閉じることでリスクを許容値以下とした．

また，コンデンシングユニットについても，店舗用パッケージエアコン，ビル用マルチエアコン同様の安全対策を行うことでリスクを許容値以下とした．

今回の検討で小形店舗の RA は完了したが，コンデンシングユニットは蒸発温度-45℃未満/圧縮機出力が 1.5kW 以下の製品を除く全製品がフロン排出抑制法の指定製品であり，中規模店舗や大規模店舗においても本来は RA を行う必要がある．しかし，これらの店舗に納入されるコンデンシングユニットは，冷媒量が 60kg を超える製品が納入されることから，今回は，ISO5149：2014 で決められた範囲内で RA を実施した．

一方，低温機器のもうひとつの主要用途となる冷凍冷蔵庫（冷凍冷蔵ユニット）についても 2016 年 7 月～11 月まで RA を行ったが，庫内は密閉されていること，庫内には着火源が存在することから，換気装置等の安全対策が必要となった．しかし，それらの安全対策はプレハブ貯蔵庫側に必要となるため，工業会単独では安全を担保できない環境にあり，RA を断念する形となった．（検討内容は，参考資料 2 を参照されたい）

今回 RA が完了したのは，小形店舗であり，コンデンシングユニット全体の 20%程度に留まるが，それよりも冷媒量又は容量の大きな製品は，冷凍保安規則及び JRA GL-18 に従い運用できる．

モントリオール議定書第 28 回締約会議では HFC 冷媒の段階的削減が採択されている状況にあり，適用範囲拡大に向けた議論が今後も必要となる．

なお，当工業会では，小形店舗の RA 結果をもとに以下の規格及びガイドラインを発行しており，今後も低温機器の機器製造業者及び設備工事業者への周知活動を継続的に行っていく．

・微燃性（A2L）冷媒を使用した低温機器の冷媒漏えい時の安全機能要求事項：JRA 4072

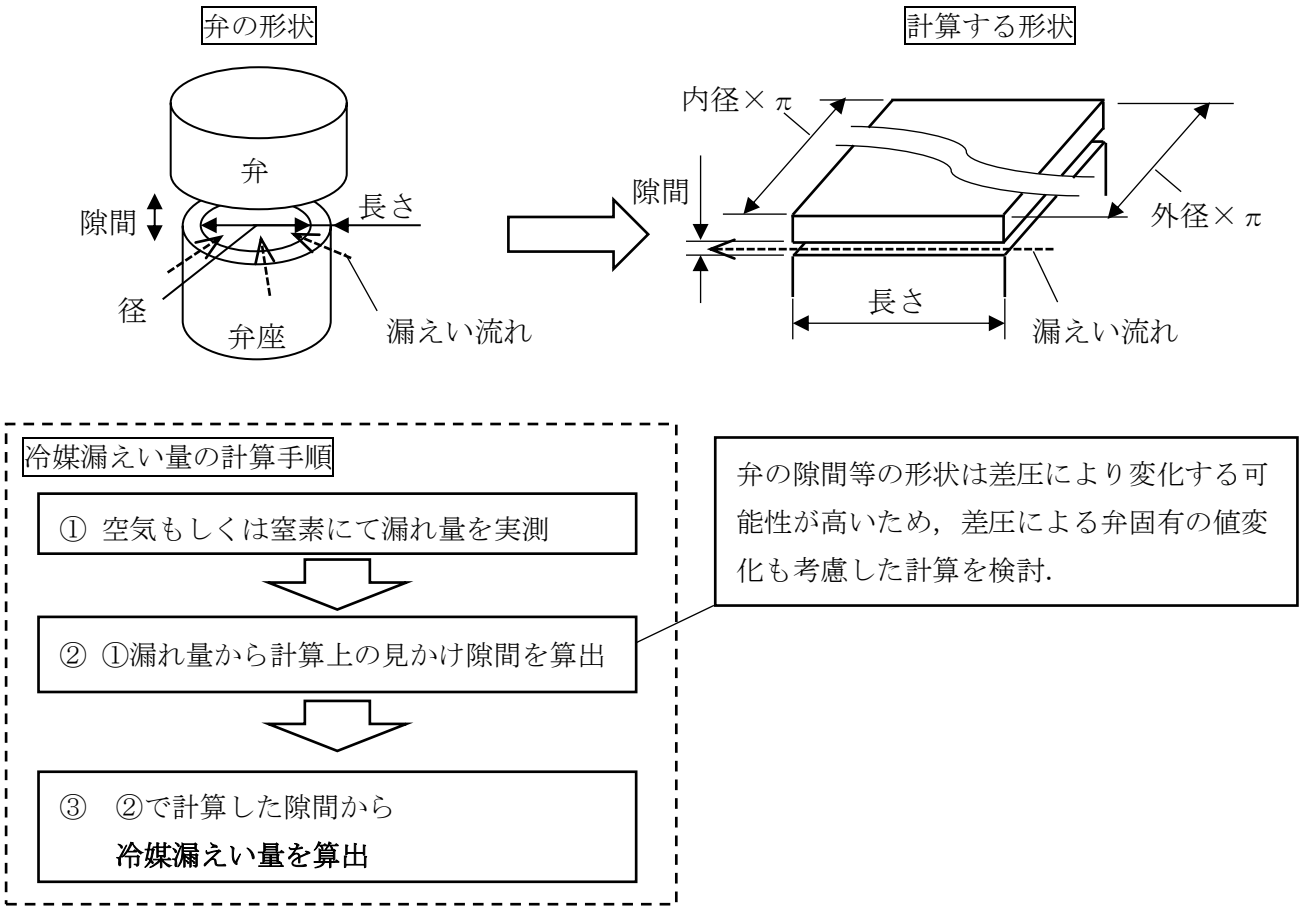
・微燃性（A2L）冷媒を使用した低温機器の冷媒漏えい時の安全確保のための施設ガイドライン：JRA GL-18

参考資料１　安全遮断弁の漏れ量検討詳細

１．平行平板漏れシミュレーションによる計算と冷媒漏れ量計算手順

CV 値以外の検討として，弁の実態形状に近い平行隙間の漏れを計算できるシミュレーションモデルを作成した[参-1)]．**参考図 1-1** に平行平板漏れシミュレーションによる隙間の計算と冷媒漏れ量の計算手順を示す．実測した空気もしくは窒素漏れ量から平行平板漏れシミュレーションにより見かけの隙間を算出し，冷媒が流れた場合も空気もしくは窒素の漏えい量に対する隙間と同じ隙間であるとして，同じシミュレーションで冷媒の漏えい量を求める．

結果は**参考表 1-1** と**参考表 1-2** のとおり．液冷媒流量の計算結果は実測に対して約 5 倍程多い流量となったが，漏れ量のオーダーは一致した．また，本シミュレーションにて摩擦損失が支配的であることは確認できたため，摩擦損失に焦点をあてて反復計算が不要な平行平板の流れを計算できるモデル式を次に検討する．



参考図 1-1　計算の概要

参考表 1-1　弁液冷媒漏えい試験・シミュレーション結果比較

差圧			MPa	0.90	1.00	1.15	1.45	1.73
窒素	実測	漏れ量(3 点平均)	cm^3/min	122	130	138	151	142
		漏れ量(質量流量)	kg/s	2.39×10^{-6}	2.55×10^{-6}	2.71×10^{-6}	2.96×10^{-6}	2.78×10^{-6}
	結果	隙間	mm	1.19×10^{-3}	1.14×10^{-3}	1.07×10^{-3}	9.53×10^{-4}	8.36×10^{-4}
液冷媒	条件	隙間	mm	1.19×10^{-3}	1.14×10^{-3}	1.07×10^{-3}	9.53×10^{-4}	8.36×10^{-4}
		一次側温度	℃	2.7	8.7	14.3	19.7	26.8
		温度(水上置換時)	℃	14.9	13.5	13.5	14.5	26.1
圧損割合	結果	流入部圧力変化	%	0.0%	0.0%	0.1%	0.0%	0.0%
		摩擦損失	%	95.1%	99.4%	98.4%	99.1%	101.9%
		加速損失	%	4.8%	0.6%	1.5%	0.9%	1.9%
		流出部圧力変化	%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	-3.8%
結果		冷媒漏れ質量流量	kg/s	2.84×10^{-5}	2.69×10^{-5}	2.58×10^{-5}	2.57×10^{-5}	2.15×10^{-5}
実測		漏れ量(3 点平均)	cm^3/min	436.7	87.3	106.3	105.0	79.0
		冷媒漏れ質量流量	kg/s	1.62×10^{-5}	$3.27\times10^{-}$	3.97×10^{-6}	3.91×10^{-6}	2.82×10^{-6}
実測漏えい量 / 計算漏えい量				57.1%	12.1%	15.4%	15.3%	13.1%

圧力 1.15MPaG の一次側温度は 14.3℃だが計算上過冷却度をつけるため 14.1℃として計算した.

参考表 1-2　樹脂弁ガス冷媒漏えい試験・シミュレーション結果比較

差圧			MPa	0．80	1．00	1．12	1．25	1．55
窒素	実測	漏れ量(3 点平均)	cm^3/min	115	130	134	160	168
		漏れ量(質量流量)	kg/s	1.60×10^{-6}	1.84×10^{-6}	1.08×10^{-6}	1.71×10^{-6}	2.22×10^{-6}
	結果	隙間	mm	1.25×10^{-3}	1.14×10^{-3}	1.09×10^{-3}	1.04×10^{-3}	9.19×10^{-4}
ガス冷媒	条件	隙間	mm	1.25×10^{-3}	1.14×10^{-3}	1.09×10^{-3}	1.04×10^{-3}	9.19×10^{-4}
		一次側温度	℃	4.0	11.8	16.7	21.9	27.2
		温度(水上置換時)	℃	13.6	12.4	12.7	12.8	17.2
圧損割合	結果	流入部圧力変化	%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
		摩擦損失	%	99.5%	99.4%	99.7%	99.4%	101.6%
		加速損失	%	0.4%	0.6%	0.3%	0.5%	2.3%
		流出部圧力変化	%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	-4.0%
計算結果		冷媒漏れ質量流量	kg/s	7.86×10^{-6}	8.60×10^{-6}	8.59×10^{-6}	1.01×10^{-5}	1.04×10^{-5}
実測		漏れ量(3 点平均)	cm^3/min	45.0	51.3	30.0	47.7	64.0
		冷媒漏れ質量流量	kg/s	1.60×10^{-6}	1.84×10^{-6}	1.08×10^{-6}	1.71×10^{-6}	2.22×10^{-6}
実測漏えい量 / 計算漏えい量				21.4%	22.4%	13.1%	17.7%	22.8%

２．平行平板の流れを計算できるモデル式による冷媒漏れ量計算

(1)モデル式に用いる記号及び単位

モデル式の検討で用いる主な記号，意味及び単位は**参考表 1-3** による．また，添え字の意味は**参考表 1-4** による．

参考表 1-3　記号，記号の意味及び単位

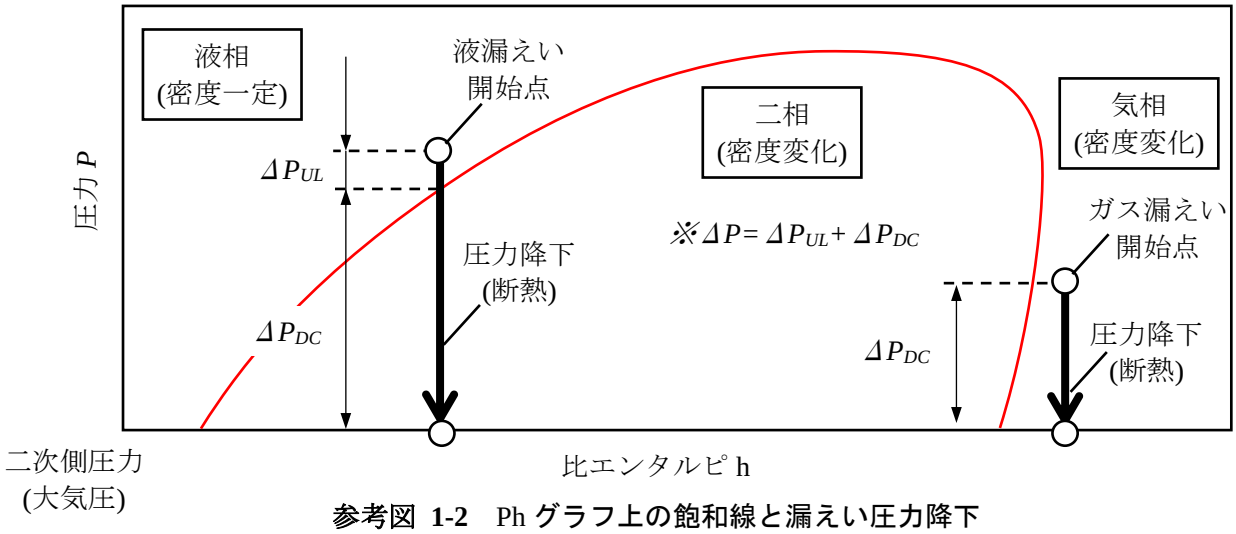
記号	意味	単位記号
ΔP	弁の一次側と二次側の圧力差	MPa
ΔP_{UL}	液相の圧力降下	MPa
ΔP_{DC}	密度変化する相の圧力降下	MPa
ΔP_{I}	ΔP_{DC}のうち前半分の圧力降下	MPa
ΔP_{II}	ΔP_{DC}のうち後半分の圧力降下	MPa
ΔP_{0}	空気漏れ試験の基準圧力差	MPa
Z	弁隙間における流体通過方向の全長	mm
Z_{UL}	弁隙間における流体通過方向の液相区間長さ	mm
Z_{I}	弁隙間における流体通過方向のΔP_{I}区間長さ	mm
Z_{II}	弁隙間における流体通過方向のΔP_{II}区間長さ	mm
α	密度変化する区間(Z- Z_{UL})の Z_{I} 比率	－
λ	管摩擦係数	－
ρ	密度	kg/m^3
u	速度	m/s
ν	動粘性係数	m^2/s
Re	レイノルズ数	－
G	質量流量	kg/s
V	体積流量	cm^3/min
L	特性長さ	m
δ	弁隙間長さ	m
D	弁口径	m
A	弁の流体通過断面積	m^2
B	弁係数	1/m^3
B_0	基準温度(20℃)における弁係数	1/m^3
F	弁係数の圧力比例定数	－
m	弁係数に対する圧力の乗数	－
E	弁係数の切片	
μ	粘性係数	Pa・s
μ_0	基準温度(20℃)における空気粘性係数(1.822Pa・s)	Pa・s
K	粘性係数における温度比例定数(固定値)	－
n	粘性係数における温度比の乗数(固定値)	－
P	圧力	MPa
P_0	大気圧(0.1MPa)	MPa
T	空気漏れ試験の雰囲気温度	℃
T_0	基準温度(20℃)	℃
T_1	弁一次側温度	℃
T_2	弁二次側温度	
x	乾き度	－
γ	Z に対する Z_{UL} の比率	－
ϕ^2	二相摩擦乗数	－
S_{max}	サブクール 0℃に対してサブクールが付いた時の最大漏えい量の比	－

参考表 1-4　添字の意味

添え字	意味
1	弁一次側
2	弁二次側
a	空気漏えい
a1	空気漏えい弁一次側
a2	空気漏えい弁二次側
L	液冷媒漏えい
L1	液冷媒漏えい弁一次側
TP1	液冷媒漏えい二相域開始点
TP2	液冷媒漏えい弁二次側(二相)
LL2	液冷媒漏えい弁二次側の分離流の液相
GL2	液冷媒漏えい弁二次側の分離流の気相
G	ガス冷媒漏えい
G1	ガス冷媒漏えい弁一次側
G2	ガス冷媒漏えい弁二次側

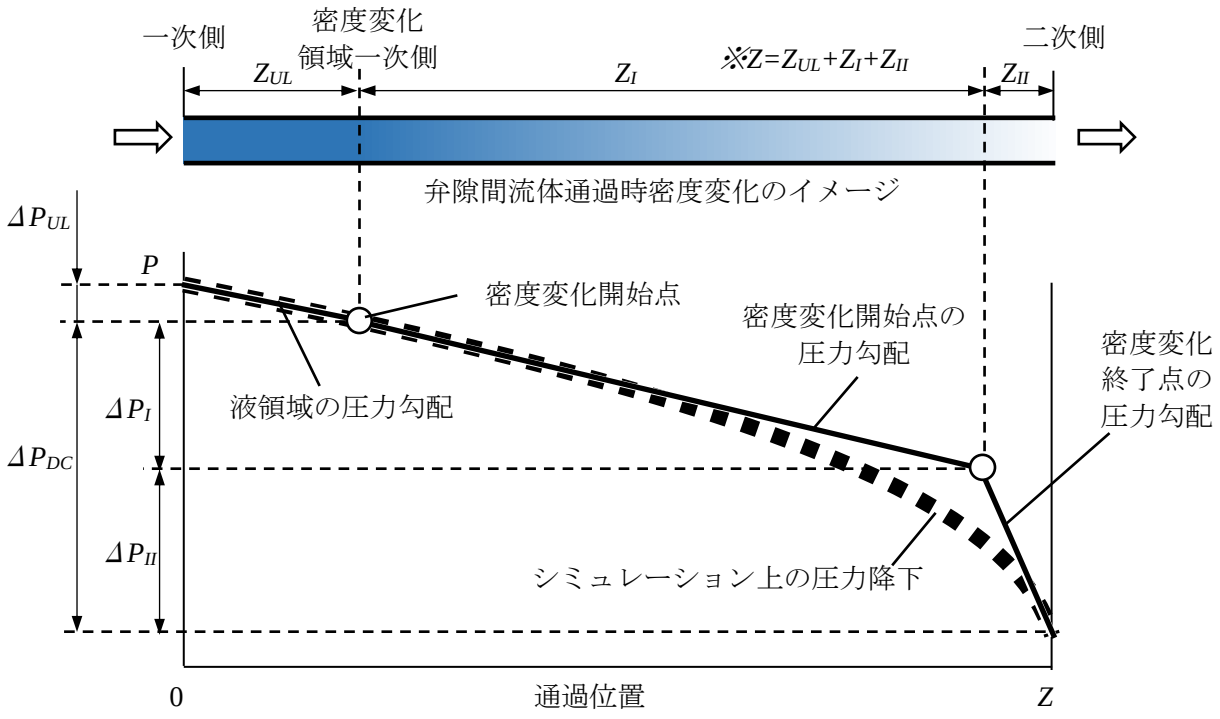
(2)モデル式による冷媒漏れ量計算の検討

弁閉止部の隙間を通過する流体は，摩擦損失が支配的でほぼ断熱変化すると考える．弁隙間上流の一次側圧力は冷凍サイクル内の圧力とし，弁隙間下流の二次側圧力は大気圧とする．**参考図 1-2** に，本検討における隙間通過時の圧力降下の考え方を Ph グラフ上に示す．ΔP_{UL} は液相の圧力降下，ΔP_{DC} は密度変化する相(二相もしくは気相)の圧力降下とする．



参考図 1-2　Ph グラフ上の飽和線と漏えい圧力降下

参考図 1-3 に隙間における流体通過位置に対する圧力の変化を示す．Z_{UL} は液相の長さ，ΔP_I は ΔP_{DC} のうち前半分の圧力降下，ΔP_{II} は ΔP_{DC} のうち後半分の圧力降下，Z_I は ΔP_I に対応する長さ，Z_{II} は ΔP_{II} に対応する長さである．



参考図 1-3　弁隙間の流体通過位置に対する圧力降下

液相では密度を一定として位置に対する圧力変化を計算できるが，気相と二相の場合は圧力に対して密度が変化するために，圧力変化の計算が複雑になる．そこで「密度変化開始点の圧力勾配」と「二次側(密度変化終了点)の圧力勾配」を用いて，圧力降下を近似化的にモデル化する．弁の一次側と二次側の圧力差ΔPは式(1)となる．

式(1)の$\left(\frac{dp}{dz}\right)_{1'}$ は密度変化開始点の圧力勾配，$\left(\frac{dp}{dz}\right)_{2'}$は二次側の圧力勾配とする．

$$\Delta P = \Delta P_{UL} + \Delta P_I + \Delta P_{II} = Z_{UL}\left(\frac{dp}{dz}\right)_{UL'} + Z_I\left(\frac{dp}{dz}\right)_{1'} + Z_{II}\left(\frac{dp}{dz}\right)_{2'} \quad \cdot\cdot\cdot(1)$$

密度変化する区間(Z_I+Z_{II})に対する Z_I の比率を α とすると，Z_I+Z_{II}= Z −Z_{UL} であるため，式(1)は式(2)となる．

$$\Delta P = Z_{UL}\left(\frac{dp}{dz}\right)_{UL'} + \alpha(Z - Z_{UL})\left(\frac{dp}{dz}\right)_{1'} + (1-\alpha)(Z - Z_{UL})\left(\frac{dp}{dz}\right)_{2'} \quad \cdot\cdot\cdot(2)$$

$$Z_I = \alpha(Z - Z_{UL}) \quad , \quad Z_{II} = (1-\alpha)(Z - Z_{UL})$$

従って，密度変化する区間(Z_I+Z_{II})に対する，密度変化を考慮する区間の長さの比は α となる．

一方，圧力勾配は摩擦損失の式(Darcy-Weisbach の式)より，式(3)のように表される．

$$\frac{dp}{dz} = \lambda\frac{1}{L}\frac{1}{2}\rho u^2 = \frac{48\nu}{\delta u}\frac{1}{2\delta}\frac{1}{2}\rho u^2 = \frac{12\nu}{\delta^2}\rho u = \frac{12\nu\rho}{\delta^2}\frac{G}{\pi D\delta\rho} = \frac{12}{\pi D\delta^3}\mathrm{G}\nu \quad \cdot\cdot\cdot(3)$$

$$\text{ここで} \quad Re = \frac{Lu}{\nu} \quad , \quad u = \frac{G}{A\rho} = \frac{G}{\pi D\delta\rho}$$

微小な隙間の場合には，特性長さは　$L = 2\delta$　,管摩擦係数は　$\lambda = \frac{96}{Re} = \frac{48\nu}{\delta u}$　となる．[参−2)]

ここで，式(3)において隙間高さ δ などの弁の正確な形状の特定は難しいため，流体の物性や状態に依存しない流路の形状に関する弁の値を実験値に基づいた弁係数 B として与えて，冷媒漏れ量を計算することにした．

【弁係数 B の算出】

まず，空気もしくは窒素で漏れ試験を行い，差圧に対する流量を測定する．この場合，一次側から気相であるため，式(2)において，$Z_{UL} = 0$ となる．空気に関する諸量を添え字 a をつけて表し，$Z_{UL} = 0$ とすると式(2)は式(4)となる．

$$\Delta P_a = \alpha_a Z\left(\frac{dp}{dz}\right)_{a1'} + (1-\alpha_a)Z\left(\frac{dp}{dz}\right)_{a2'} \quad \cdot\cdot\cdot(4)$$

式(3)を式(4)に代入すると式(5)となる．

$$\Delta P_a = \alpha_a Z\frac{12}{\pi D\delta^3}\mathrm{G}_a\nu_{a1} + (1-\alpha_a)Z\frac{12}{\pi D\delta^3}\mathrm{G}_a\nu_{a2} \quad \cdot\cdot\cdot(5)$$

式(5)においてν_{a1}は一次側の流体の動粘性係数，ν_{a2}は二次側の流体の動粘性係数となる．

ここで弁係数 B を式(6)とおくと

$$B = Z\frac{12}{\pi D\delta^3} \quad ・・・(6)$$

となる．式(5)に式(6)を代入し，式(7)となる．

$$\Delta P_a = \alpha_a B\mathrm{G}_a\nu_{a1} + (1-\alpha_a)B\mathrm{G}_a\nu_{a2} = BG_a\{\alpha_a\nu_{a1} + (1-\alpha_a)\nu_{a2}\} \quad ・・・(7)$$

式(7)を変形すると式(8)が得られ，空気もしくは窒素漏れ試験の結果から弁係数 B を特定することができる．

$$B = \frac{\Delta P_a}{G_a\{\alpha_a\nu_{a1} + (1-\alpha_a)\nu_{a2}\}} \quad ・・・(8)$$

ここで, **参考図 1-3** において, シミュレーション上の ΔP_{DC} における圧力勾配は連続的に変化するが, 計算簡易化のため圧力勾配が中間点で変化すると仮定し，$\Delta P_I = \Delta P_{II}$ とした．領域(Z_I)の圧力と領域(Z_{II})の圧力の交点が，密度変化開始点圧力と二次側圧力の中間(($\Delta P_I = \Delta P_{II}$)となると仮定して α を決める．式(7)において $\Delta P_I = \Delta P_{II}$ となるので,

$$\Delta P_I = \Delta P_{II} = \alpha_a BG\nu_{a1} = (1-\alpha_a)BG\nu_{2a} \quad \Rightarrow \quad \alpha_a\nu_{1a} = (1-\alpha_a)\nu_{a2}$$

α は式(9)となる．

$$\alpha_a = \frac{\nu_{a2}}{\nu_{a1} + \nu_{a2}} \quad ・・・(9)$$

弁係数の式(8)に式(9)を代入すると式(10)になる．

$$B = \frac{\Delta P_a}{G_a\left\{\frac{\nu_{a2}}{\nu_{a1} + \nu_{a2}}\nu_{a1} + (1 - \frac{\nu_{a2}}{\nu_{a1} + \nu_{a2}})\nu_{a2}\right\}} = \frac{\Delta P_a}{G_a\frac{2\nu_{a1}\nu_{a2}}{\nu_{a1} + \nu_{a2}}}$$

$$B = \frac{\Delta P_a(\nu_{a1} + \nu_{a2})}{2G_a\nu_{a1}\nu_{a2}} \quad ・・・(10)$$

参考表 1-5　弁係数 B に関わる物性

式	記号	名称	説明
$B = \frac{\Delta P_a(\nu_{a1} + \nu_{a2})}{2G_a\nu_{a1}\nu_{a2}}$	ΔP_a	空気試験差圧	差圧
	G_a	空気試験質量流量	水上置換体積×大気密度
	ν_{a1}	空気一次側動粘性係数	空気一次側の物性
	ν_{a2}	空気二次側動粘性係数	大気圧物性に固定

参考表 1-5 に示すように ΔP_a，G_a は実験により与えられる．従って ν_{a1}，ν_{a2} を与えられれば弁係数 B が得られる．

動粘性係数 ν は粘性係数 μ と密度 ρ の比で「$\nu = \mu/\rho$」となるため，μ と ρ に切り分けて考える．

μ は温度依存性があり，温度 T とすると「$\mu = KT^n$」と近似される．(K と n は物質の固定値)

基準となる温度 T_0(20℃)のときの粘性係数を μ_0 とすると，温度 T の時の一次側粘性係数 μ_{a1} は次式となる．さらに，空気漏えい量の測定時に一次側と二次側の温度が同じであれば，$\mu_{a1} = \mu_{a2}$ となる．

$$\mu_{a1} = \mu_0 \frac{(T+273)^n}{(T_0+273)^n} = \mu_0 \left(\frac{T+273}{T_0+273}\right)^n = \mu_{a2}$$

次に密度について考える．基準となる圧力P_0(大気圧)の基準温度T_0(20℃)の時の密度をρ_0とすると，温度T時の一次側圧力$P_{a1}(= \Delta P_a + P_0)$の一次側密度$\rho_{a1}$と，二次側圧力$P_{a2}$(大気圧$= P_0$)の二次側密度$\rho_{a2}$は Boyle-Charles'の法則より次式となる．

$$\rho_{a1} = \rho_0 \frac{\Delta P_a + P_0}{P_0} \frac{(T_0+273)}{(T+273)} \quad , \quad \rho_{a2} = \rho_0 \frac{P_{a2}}{P_0} \frac{(T_0+273)}{(T+273)} = \rho_0 \frac{(T_0+273)}{(T+273)}$$

従って一次側と二次側の動粘性係数はそれぞれ次のように表される．

$$\nu_{a1} = \frac{\mu_{a1}}{\rho_{a1}} = \mu_0 \left(\frac{T+273}{T_0+273}\right)^n \left(\rho_0 \frac{\Delta P_a + P_0}{P_0} \frac{(T_0+273)}{(T+273)}\right)^{-1} = \frac{\mu_0}{\rho_0} \frac{P_0}{P_{a1}} \left(\frac{T+273}{T_0+273}\right)^{n+1} = \nu_0 \frac{P_0}{P_{a1}} \left(\frac{T+273}{T_0+273}\right)^{n+1}$$

$$\nu_{a2} = \frac{\mu_{a2}}{\rho_{a2}} = \mu_0 \left(\frac{T+273}{T_0+273}\right)^n \left(\rho_0 \frac{T_0+273}{T+273}\right)^{-1} = \frac{\mu_0}{\rho_0} \left(\frac{T+273}{T_0+273}\right)^{n+1} = \nu_0 \left(\frac{T+273}{T_0+273}\right)^{n+1}$$

弁係数 B の式(10)の動粘性係数を，上式を用いて大気圧 20℃基準の値に置き換えると次式が得られる．

$$B = \frac{\Delta P_a(\nu_{a1} + \nu_{a2})}{2G_a \nu_{a1} \nu_{a2}} = \frac{\Delta P_a \left(\nu_0 \frac{P_0}{\Delta P_a + P_0} \left(\frac{T+273}{T_0+273}\right)^{n+1} + \nu_0 \left(\frac{T+273}{T_0+273}\right)^{n+1}\right)}{2G_a \nu_0 \frac{P_0}{\Delta P_a + P_0} \left(\frac{T+273}{T_0+273}\right)^{n+1} \nu_0 \left(\frac{T+273}{T_0+273}\right)^{n+1}}$$

$$= \frac{\Delta P_a \nu_0 \left(\frac{T+273}{T_0+273}\right)^{n+1} \left(\frac{P_0}{\Delta P_a + P_0} + 1\right)}{2G_a {\nu_0}^2 \frac{P_0}{\Delta P_a + P_0} \left(\frac{T+273}{T_0+273}\right)^{2(n+1)}}$$

$$= \frac{\Delta P_a}{2G_a \nu_0} \left(\frac{\Delta P_a + P_0}{P_0} + 1\right) \left(\frac{T_0+273}{T+273}\right)^{n+1} = \frac{\Delta P_a}{2G_a \nu_0} \left(\frac{\Delta P_a}{P_0} + 2\right) \left(\frac{T_0+273}{T+273}\right)^{n+1}$$

さらに，質量流量G_aを雰囲気温度Tで水上置換した体積V_{a2}に置き換える．空気漏えい量の測定時に，雰囲気温度 T も一次側と二次側の温度に等しければ

$$G_a = V_{a2} \rho_{a2} = V_{a2} \rho_0 \frac{T+273}{T_0+273}$$

であるため，弁係数 B は

$$\mathrm{B} = \frac{\Delta P_a}{2V_{a2} \rho_0 \frac{T}{T_0} \nu_0} \left(\frac{\Delta P_a}{P_0} + 2\right) \left(\frac{T_0+273}{T+273}\right)^{n+1} = \frac{\Delta P_a}{2V_{a2} \mu_0} \left(\frac{\Delta P_a}{P_0} + 2\right) \left(\frac{T_0+273}{T+273}\right)^{n}$$

参考表 1-6　弁係数 B に関わる変数を置換えた場合(単位付)

式	記号	単位	名称	説明
$B=\dfrac{\Delta P_a}{2V_{a2}\mu_0}\left(\dfrac{\Delta P_a}{P_0}+2\right)\left(\dfrac{T_0+273}{T+273}\right)^n \times 60\times 10^{12}[\mathrm{m}^{-3}]$	ΔP_a	MPa	空気試験差圧	差圧
	V_{a2}	cm^3/min	空気試験体積流量	雰囲気温度Tの水上置換
	T	℃	空気試験雰囲気温度	一次側二次側も同じ
	P_0	MPa	大気圧	0．1MPa
	T_0	℃	基準温度	20℃
	μ_0	$Pa\cdot s$	基準温度の空気粘性係数	T_0の空気粘性係数
	n	-	温度比の乗数	空気・窒素の場合 0．8

参考表 1-6 に示すようにΔP_a，V_{a2}，Tは実験により与えられる．従ってP_0，T_0，μ_0，nを与えられれば弁係数 B が得られる．P_0，T_0，μ_0，n(色つきの変数)は一定値で固定する．

空気もしくは窒素では温度と粘性係数の関係は$n=0.8$とすると良く合う．$0\le T[℃]\le 40$ かつ $0.5\le \Delta P_a[MPa]\le 2.0$の範囲において，**参考表 1-5** の B の値を Refprop9.1 の物性値を用いて計算した場合と，**参考表 1-6** で 20℃の物性値を基準として計算した場合のBの値との差は+0.11%～+1.18%となる．

さらに試験を雰囲気温度 20℃に固定して行えば,

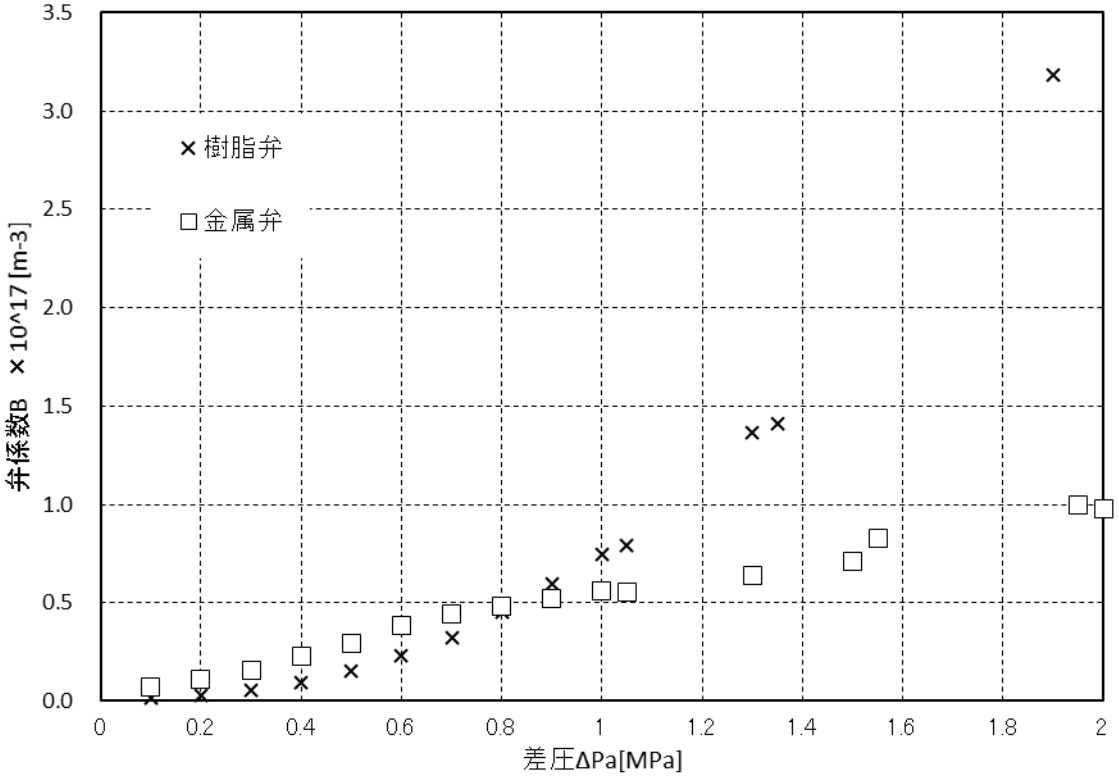
$$B=\frac{\Delta P_a}{2V_{a2}\times 1.822\times 10^{-5}}\left(\frac{\Delta P_a}{0.1}+2\right)(1)^n\times 60\times 10^{12}[m^{-3}]$$

$$=\frac{16.47\Delta P_a}{V_{a2}}(10\Delta P_a+2)\times 10^{17}[m^{-3}]$$

数字を丸めると次の様になる．

$$B\cong\frac{33\Delta P_a(5\Delta P_a+1)}{V_{a2}}\times 10^{17}[m^{-3}]$$

試験で得られたΔP_aとV_{a2}を用いて弁係数Bを計算し，**参考図 1-4** に差圧ΔP_aに対してプロットする．**参考図 1-4** より弁係数Bは圧力により変化することがわかる．



参考図 1-4　窒素差圧ΔP_aと弁係数Bの相関

グラフの形状から弁係数Bは差圧ΔP_aに対して次式で表されると仮定する．

$$B = F\Delta P_a{}^m \quad (F, m\text{は係数})$$

また，基準となる特定のポイントにおける差圧ΔP_{a0}の弁係数B_0を基準とすれば，

$$B_0 = F\Delta P_{a0}{}^m \quad (F, m\text{は係数})$$

$$B = B_0\left(\frac{\Delta P_a}{\Delta P_{a0}}\right)^m \quad , \quad \left(m = \log_{\frac{\Delta P_a}{\Delta P_{a0}}}\frac{B}{B_0}\right)$$

任意のΔP_aに対して弁係数 B を簡易的に求めることができる．

例えば参考図 1-4 において，基準値を$\Delta P_{a0} = 1\text{MPa}$とすると，

樹脂弁では　　$m = 2.25 \quad (0.4 \leq \Delta P_a[MPa] \leq 1.9)$

金属弁では　　$m = 0.88 \quad (0.5 \leq \Delta P_a[MPa] \leq 2.5)$

で差圧ΔP_aと弁係数 B の関係はよく表現される．実際に数点の試験結果から係数 m を求める場合には，なるべく離れた 2 点で試験することが望ましい．

【液冷媒漏えい】

次に弁係数 B を用いて液冷媒漏えいの検討を行う．

式(2)において，液冷媒の添え字を L とし，二相域の添え字を TP とすると式(11)になる．

$$\Delta P_L = Z_{UL}\left(\frac{dp}{dz}\right)_{UL'} + \alpha_L(Z - Z_{UL})\left(\frac{dp}{dz}\right)_{TP1'} + (1-\alpha_L)(Z - Z_{UL})\left(\frac{dp}{dz}\right)_{TP2'} \quad \cdot\cdot\cdot(11)$$

ここで，Z_{UL} は Z 全体の γ 倍であるとして $Z_{UL}= \gamma Z$ と置き換える．

$$\Delta P_L = \gamma Z\left(\frac{dp}{dz}\right)_{UL'} + \alpha_L(1-\gamma)Z\left(\frac{dp}{dz}\right)_{TP1'} + (1-\alpha_L)(1-\gamma)Z\left(\frac{dp}{dz}\right)_{TP2'} \quad \cdot\cdot\cdot(12)$$

参考図 1-3 において密度変化開始点は液単相と考え式(13)

$$\left(\frac{dp}{dz}\right)_{TP1'} = \left(\frac{dp}{dz}\right)_{UL'} \quad \cdot\cdot\cdot(13)$$

式(12)に式(13)を代入し式(14)になる．

$$\begin{aligned}\Delta P_L &= \gamma Z\left(\frac{dp}{dz}\right)_{UL'} + \alpha_L(1-\gamma)Z\left(\frac{dp}{dz}\right)_{UL'} + (1-\alpha_L)(1-\gamma)Z\left(\frac{dp}{dz}\right)_{TP2'} \\ &= \left(\gamma + \alpha_L(1-\gamma)\right)Z\left(\frac{dp}{dz}\right)_{UL'} + (1-\alpha_L)(1-\gamma)Z\left(\frac{dp}{dz}\right)_{TP2'} \quad \cdot\cdot\cdot(14)\end{aligned}$$

式(14)において一次側は液単相であるため，関連する右辺第一項の$Z\left(\frac{dp}{dz}\right)_{UL'}$を式(3)と式(6)を用いて表すと式(15)になる．

$$Z\left(\frac{dp}{dz}\right)_{UL'} = Z\frac{12}{\pi D\delta^3}G_L\nu_{L1} = BG_L\nu_{L1} \quad \cdot\cdot\cdot(15)$$

二次側は二相となるため，$\left(\frac{dp}{dz}\right)_{TP2'}$は Lockhart-Martinelli 相関を用いて式(16)となる．

添え字 $GL2$ は二次側の分離流の気相の変数，添え字 $LL2$ は二次側の分離流の液相の変数とする．

$$\left(\frac{dp}{dz}\right)_{TP2'} = \emptyset_{GL2}{}^2\left(\frac{dp}{dz}\right)_{GL2} = \emptyset_{LL2}{}^2\left(\frac{dp}{dz}\right)_{LL2} \quad \cdot\cdot\cdot(16)$$

ここで，

$$\emptyset_{LL2}{}^2 = 1 + \frac{C}{X} + \frac{1}{X^2} \quad , \quad \emptyset_{GL2}{}^2 = 1 + CX + X^2 \quad \cdot\cdot\cdot(17)$$

$$X^2 = \left(\frac{1-x_2}{x_2}\right)\left(\frac{\rho_{GL2}}{\rho_{LL2}}\right)\left(\frac{\mu_{LL2}}{\mu_{GL2}}\right) = \left(\frac{1-x_2}{x_2}\right)\left(\frac{\nu_{LL2}}{\nu_{GL2}}\right) \quad \cdot\cdot\cdot(18)$$

x_2は二次側における乾き度とする．

Chisholm によれば両相が層流の場合に式(19)の係数は C=5 が推奨されるが，マイクロチャンネル化した流れにおいて 0.24 や 0.66 といった値が実験値に近似するという文献 [参-3)]がある．また，弁隙間は非常に狭いものを想定しており，0.24 が 0 になっても影響が少なく簡易化のため C=0 とすると，式(17)と式(18)は式(19)になる．

$$\left.\begin{aligned} \emptyset_{LL2}{}^2 &= 1+\frac{C}{X}+\frac{1}{X^2} = 1+\left(\frac{x_2}{1-x_2}\right)\left(\frac{\nu_{GL2}}{\nu_{LL2}}\right) \\ \emptyset_{GL2}{}^2 &= 1+CX+X^2 = 1+\left(\frac{1-x_2}{x_2}\right)\left(\frac{\nu_{LL2}}{\nu_{GL2}}\right) \end{aligned}\right\} \quad \cdot\cdot\cdot(19)$$

式(14)のうち長さ Z と二相域の圧力勾配の項は，式(16)～式(19)において気相側の圧力勾配(添え字 *GL2*)に基づいて計算する．

Lockhart-Martinelli 相関では気相が管を満たして流れる場合の見かけの速度を使うために，気相の質量流量は全体の質量流量と乾き度で$G_{GL2}=G_L x_2$と置き換え，弁係数 B(式(6))を用いると，

$$Z\left(\frac{dp}{dz}\right)_{TP2'} = Z\emptyset_{GL2}{}^2\left(\frac{dp}{dz}\right)_{GL2} = \left\{1+\left(\frac{1-x_2}{x_2}\right)\left(\frac{\nu_{LL2}}{\nu_{GL2}}\right)\right\}BG_{GL2}\nu_{GL2} = \left\{1+\left(\frac{1-x_2}{x_2}\right)\left(\frac{\nu_{LL2}}{\nu_{GL2}}\right)\right\}BG_L x_2\nu_{GL2}$$

$$\Rightarrow \quad Z\left(\frac{dp}{dz}\right)_{TP2'} = \{x_2\nu_{GL2}+(1-x_2)\nu_{LL2}\}BG_L \quad \cdot\cdot\cdot(20)$$

したがって，式(20)は気相と液相の動粘性係数と乾き度のみの式となった．

式(15)，式(16)，式(20)をまとめると

$$\begin{aligned} \Delta P_L &= \big(\gamma+\alpha_L(1-\gamma)\big)Z\left(\frac{dp}{dz}\right)_{UL'} + (1-\alpha_L)(1-\gamma)Z\left(\frac{dp}{dz}\right)_{TP2'} \\ &= \big(\gamma+\alpha_L(1-\gamma)\big)BG_L\nu_{L1} + (1-\alpha_L)(1-\gamma)\{x_2\nu_{GL2}+(1-x_2)\nu_{LL2}\}BG_L \\ &= \mathrm{BG}_L\big\{\big(\gamma+\alpha_L(1-\gamma)\big)\nu_{L1} + (1-\alpha_L)(1-\gamma)(x_2\nu_{GL2}+(1-x_2)\nu_{LL2})\big\} \end{aligned}$$

$$\mathrm{G}_L = \frac{\Delta P_L}{B\big\{\big(\gamma+\alpha_L(1-\gamma)\big)\nu_{L1}+(1-\alpha_L)(1-\gamma)(x\nu_{GL2}+(1-x)\nu_{LL2})\big\}} \quad \cdot\cdot\cdot(21)$$

液冷媒の漏えいの場合，式(9)のν_2に相当する項は$\nu_{L2'}$であり，式(21)において$\nu_{L2'}$は$\{x_2\nu_{GL2}+(1-x_2)\nu_{LL2}\}$で表されるため，$\alpha_L$は式(22)となる，

$$\alpha_L = \frac{\nu_{L2'}}{\nu_{L1}+\nu_{L2'}} = \frac{x\nu_{GL2}+(1-x_2)\nu_{LL2}}{\nu_{L1}+x\nu_{GL2}+(1-x_2)\nu_{LL2}} \quad \cdot\cdot\cdot(22)$$

式(21)に式(22)を代入すると式(23)になる．($\nu_{L2'} = x_2\nu_{GL2}+(1-x_2)\nu_{LL2}$)と置く)

$$G_L = \frac{\Delta P_L}{B\left\{\left(\gamma+\frac{\nu_{L2'}}{\nu_{L1}+\nu_{2L'}}(1-\gamma)\right)\nu_{L1}+\left(1-\frac{\nu_{L2'}}{\nu_{L1}+\nu_{L2'}}\right)(1-\gamma)\nu_{L2'}\right\}}$$

$$= \frac{\Delta P_L}{B\left\{\gamma\nu_{L1} + \nu_{L2'}\left(\frac{\nu_{L1} - \nu_{L2'}}{\nu_{L1} + \nu_{2L'}} + 1\right)(1-\gamma)\right\}} = \frac{\Delta P_L}{B\left\{\gamma\nu_{L1} + \frac{2\nu_{L1}\nu_{L2'}(1-\gamma)}{\nu_{L1} + \nu_{2L'}}\right\}}$$

$$= \frac{\Delta P_L}{B\left(\frac{2\nu_{L1}\nu_{L2'} - 2\gamma\nu_{L1}\nu_{L2'} + \gamma{\nu_{L1}}^2 + \gamma\nu_{L1}\nu_{2L'}}{\nu_{L1} + \nu_{2L'}}\right)} = \frac{\Delta P_L(\nu_{L1} + \nu_{2L'})}{B\nu_{L1}(\gamma\nu_{L1} + 2\nu_{L2'} - \gamma\nu_{L2'})}$$

$$= \frac{\Delta P_L(\nu_{L1} + \nu_{2L'})}{B\nu_{L1}\{\gamma\nu_{L1} + (2-\gamma)\nu_{L2'}\}} \quad \cdot\cdot\cdot (23)$$

式(23)に$\nu_{L2'} = x_2\nu_{GL2} + (1-x_2)\nu_{LL2}$を代入すると式(24)になる．

$$G_L = \frac{\Delta P_L\{\nu_{L1} + x_2\nu_{GL2} + (1-x_2)\nu_{LL2}\}}{B\nu_{L1}\{\gamma\nu_{L1} + (2-\gamma)(x_2\nu_{GL2} + (1-x_2)\nu_{LL2})\}} \quad \cdot\cdot\cdot (24)$$

ただし，式(24)では流路全長に対する液相距離の比であるγを決めなければならない．
式(1)と式(15)より，γは式(25)のように液相の圧力降下ΔP_{UL}の関数となる．

$$\Delta P_{UL} = \gamma Z\left(\frac{dp}{dz}\right)_{UL'} = \gamma Z\frac{12}{\pi D\delta^3}G_L\nu_{L1} = \gamma BG_L\nu_{L1} \quad \Rightarrow \quad \gamma = \frac{\Delta P_{UL}}{BG_L\nu_{L1}} \quad \cdot\cdot\cdot (25)$$

式(23)をγについて整理し，式(26)となり，式(26)に式(25)を代入しG_Lについて整理すると式(27)となる．

$$G_L = \frac{\Delta P_L(\nu_{L1} + \nu_{2L'})}{B\nu_{L1}(\gamma(\nu_{L1} - \nu_{L2'}) + 2\nu_{L2'})} \quad \cdot\cdot\cdot (26)$$

$$G_L = \frac{\Delta P_L(\nu_{L1} + \nu_{2L'})}{B\nu_{L1}\left(\frac{\Delta P_{UL}}{BG_L\nu_{L1}}(\nu_{L1} - \nu_{L2'}) + 2\nu_{L2'}\right)} = \frac{\Delta P_L(\nu_{L1} + \nu_{2L'})}{\frac{\Delta P_{UL}}{G_L}(\nu_{L1} - \nu_{L2'}) + 2B\nu_{L1}\nu_{L2'}}$$

$$G_L\left\{\frac{\Delta P_{UL}}{G_L}(\nu_{L1} - \nu_{L2'}) + 2B\nu_{L1}\nu_{L2'}\right\} = \Delta P_L(\nu_{L1} + \nu_{2L'})$$

$$2BG_L\nu_{L1}\nu_{L2'} = \Delta P_L(\nu_{L1} + \nu_{2L'}) - \Delta P_{UL}(\nu_{L1} - \nu_{L2'}) = \nu_{L1}(\Delta P_L - \Delta P_{UL}) + \nu_{2L'}(\Delta P_L + \Delta P_{UL})$$

$$G_L = \frac{\nu_{L1}(\Delta P_L - \Delta P_{UL}) + \nu_{2L'}(\Delta P_L + \Delta P_{UL})}{2B\nu_{L1}\nu_{L2'}}$$

$$G_L = \frac{1}{2B}\left(\frac{\Delta P_L + \Delta P_{UL}}{\nu_{L1}} + \frac{\Delta P_L - \Delta P_{UL}}{\nu_{L2'}}\right) \quad \cdot\cdot\cdot (27)$$

式(27)に$\nu_{L2'} = x_2\nu_{GL2} + (1-x_2)\nu_{LL2}$を代入すると式(28)となる．

$$G_L = \frac{1}{2B}\left(\frac{\Delta P_L + \Delta P_{UL}}{\nu_{L1}} + \frac{\Delta P_L - \Delta P_{UL}}{x_2\nu_{GL2} + (1-x_2)\nu_{LL2}}\right) \quad \cdot\cdot\cdot (28)$$

Refprop9.1 の物性を用いて式(10)により弁係数 B を計算し，さらに二次側における乾き度を求めて，式(28)により液冷媒漏れ量を計算し，**参考表 1-1** に示す平行平板漏れシミュレーションの結果と比較すると**参考表 1-7** のようになり，シミュレーションと式(28)の簡易モデルによる結果はほぼ同じ結果となる．

参考表 1-7　Refprop9.1 の物性と液媒漏えい量の式を用いた計算結果とシミュレーションの結果比較

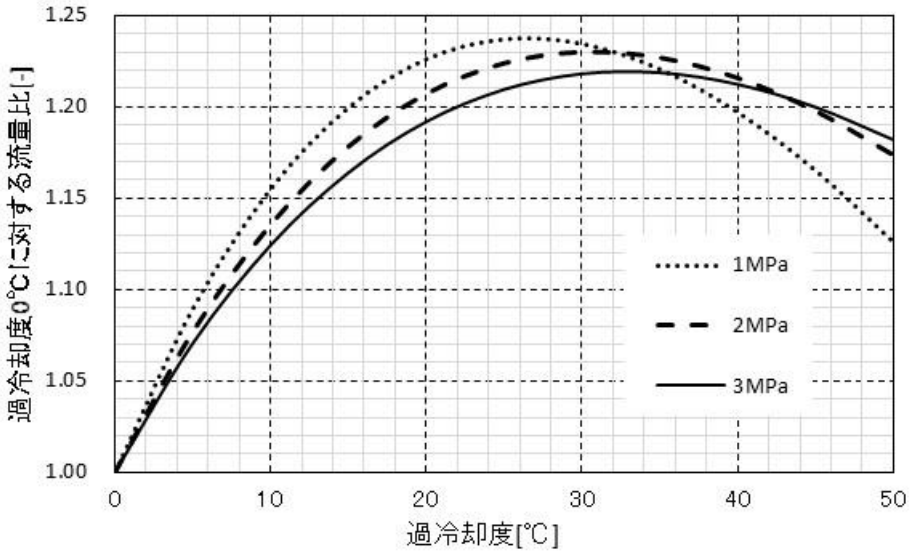
圧力	MPaG	0.90	1.00	1.15	1.45	1.73
式(27)簡易モデルの結果	**kg/s**	**2.96×10^{-5}**	**2.80×10^{-5}**	**2.66×10^{-5}**	**2.57×10^{-5}**	**2.11×10^{-5}**
シミュレーション結果	kg/s	2.84×10^{-5}	2.69×10^{-5}	2.58×10^{-5}	2.57×10^{-5}	2.15×10^{-5}

参考表 1-8 に示すように，式(28)において色つきの物性値を与えれば計算が可能となるが，次に Refprop 等を使わずにこれらの計算ができるような方法を検討する．

参考表 1-8　液冷媒漏えい量G_Lに関わる変数

式	記号	名称	説明
$G_L = \frac{1}{2B}\left(\frac{\Delta P_L + \Delta P_{UL}}{\nu_{L1}} + \frac{\Delta P_L - \Delta P_{UL}}{x_2\nu_{GL2} + (1-x_2)\nu_{LL2}}\right)$	ΔP_L	液冷媒漏えい差圧	設定差圧
	ν_{L1}	液冷媒一次側動粘性係数	液冷媒一次側の物性
	ν_{GL2}	液冷媒二次側気相動粘性係数	冷媒大気圧露点物性に固定
	ν_{LL2}	液冷媒二次側液相動粘性係数	冷媒大気圧沸点物性に固定
	x_2	液冷媒二次側乾き度	二相流の乾き度
	ΔP_{UL}	液冷媒液相の差圧	「一次側圧力」と「一次側エンタルピと等しい飽和液圧」との差圧

液冷媒漏えいの式において，過冷却度 0℃の場合よりも過冷却度をつけた場合の方が漏えい量が多いが，過冷却度に対して**参考図 1-5** に示すように漏えい量にはピークがある．



参考図 1-5　過冷却度が付いた場合の過冷却度 0℃の漏えい量に対する漏えい量比(R32 の場合)

過冷却度 0℃の漏えい量に対してピーク漏えい量が最大S_{max}倍であるとすると，各冷媒のS_{max}は**参考表 1-9** のようになる．

参考表 1-9　冷媒とS_{max}

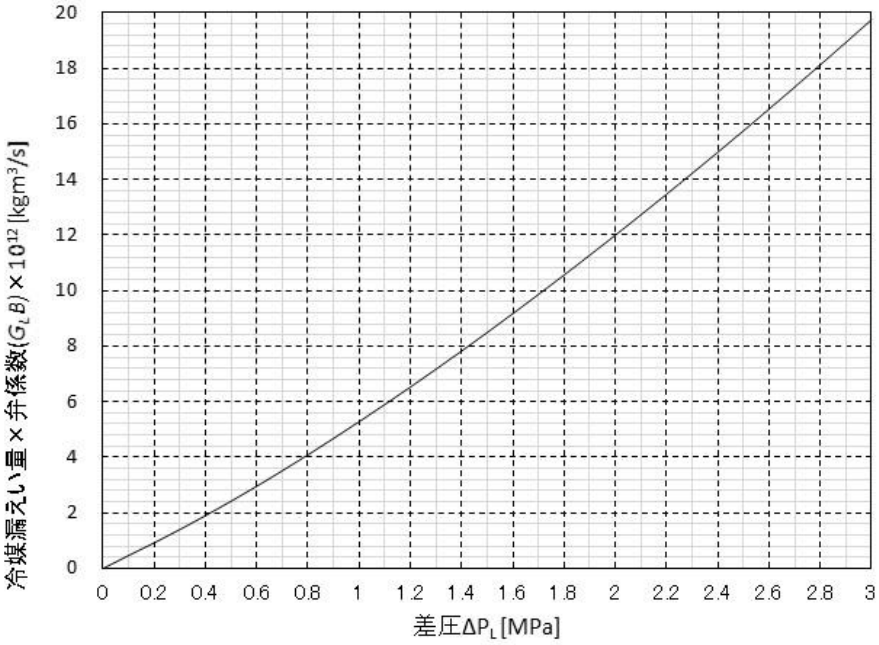
冷媒	R32	R1234yf	R1234ze	R152a	R600a	R290	R125	R143a	R134a	R410A	R404A
S_{max}[-]	1.23	1.17	1.17	1.18	1.21	1.20	1.13	1.17	1.16	1.20	1.16

よって，過冷却度 0℃の状態に対してS_{max}を与えれば，各冷媒の最大漏えい量が分かる．

$$G_L = \frac{1}{2B}\left(\frac{\Delta P_L + 0}{\nu_{L1}} + \frac{\Delta P_L - 0}{x_2\nu_{GL2} + (1-x_2)\nu_{LL2}}\right)S_{max} = \frac{\Delta P_L S_{max}}{2B}\left(\frac{1}{\nu_{L1}} + \frac{1}{x_2\nu_{GL2} + (1-x_2)\nu_{LL2}}\right)$$

R32 について液冷媒一次側動粘性係数ν_{L1}と二次側乾き度x_2を求め，次式の冷媒漏えい量G_L×弁係数Bを差圧ΔP_Lに対して計算すると**参考図 1-6** のようになる．

$$G_L B = \frac{\Delta P_L S_{max}}{2}\left(\frac{1}{\nu_{L1}} + \frac{1}{x_2\nu_{GL2} + (1-x_2)\nu_{LL2}}\right)$$



参考図 1-6　差圧ΔP_Lと冷媒漏えい量G_L×弁係数Bの相関

参考図 1-6 の関係をΔP_Lの二次式で近似すると次のようになる．

$$G_L B = \Delta P_L(0.62\Delta P_L + 4.7) \times 10^{12}[kgm^3/s]$$

$$G_L = \frac{\Delta P_L(0.62\Delta P_L + 4.7)}{B} \times 10^{12}[kg/s]$$

この式を用いて液冷媒の漏えい量を簡易的に求めることができる．

これまでの計算式を用い，**参考表 1-10** に樹脂弁の漏えいの計算手順と結果及び実測との比較，**参考表 1-11** に金属弁の漏えいの計算手順と結果及び実測との比較を示す．

参考表 1-10　樹脂弁における計算漏えい量と実測漏えい量の比較

【手順1.弁係数Bの算出】

① 遮断弁に対し、空気・窒素で差圧を掛けて漏えい量を3点測定.
(二次側は大気圧，水上置換，雰囲気温度20℃前後)
今回は計測したから代表で差圧0.5MPa , 1.0MPa , 2.0MPaの値を使用して計算する.
3点の計測箇所を選ぶポイントとしては次の2点
・3点の差圧の幅は広くとる. (対数計算を行うため、幅が狭いと誤差を大きく拾う)
・冷媒漏えいの計算に使用しないような低い差圧は用いない. (不安定なため)

② 次式にて3点の弁係数Bを計算する.

$$B \cong \frac{33\Delta P_a(5\Delta P_a + 1)}{V_{a2}} \times 10^{17}[m^{-3}]$$

			記号	単位	点1	点2	点3
窒素	計算条件	差圧	ΔP_a	MPa	0.5	1.0	2.0
		漏れ体積(水上置換)	V_{a2}	cm^3/min	420	280	230
	計算値	弁係数	B	$1/m^3$	1.38×10^{16}	7.07×10^{16}	3.16×10^{16}

③ **参考図1-4**に示す弁係数Bのm乗近似曲線を作るため,
②で計算した差圧ΔP_aと弁係数Bを用いてmを計算する.
3点のデータに対し，基準とする差圧がΔP_{a0}ともう1点の差圧ΔP_a組合わせとして，
3!/2=3パターン計算できるため，それを平均化する.
mの計算式

$$m = \log_{\frac{\Delta P_a}{\Delta P_{a0}}} \frac{B}{B_0}$$

ΔP_{a0}	ΔP_a	m
0.5MPa	1.0MPa	2.36
0.5MPa	2.0MPa	2.26
1.0MPa	2.0MPa	2.16
平均		2.26

基準点をΔP_{a0}=1.0MPaとした場合の弁係数Bは以下になる.

$$B = B_0\left(\frac{\Delta P_a}{\Delta P_{a0}}\right)^m$$

$$B = 7.07\Delta P_a{}^{2.26} \times 10^{16}[1/m^3]$$

記号	単位	基準の値
ΔP_{a0}	MPa	1.0
B_0	$1/m^3$	7.07×10^{16}
m	-	2.26

【手順2液冷媒漏えい量の算出】

前述で求めた弁係数Bを以下の式に代入し，想定される冷媒漏えい量を求める.

$$G_L = \frac{\Delta P_L(0.62\Delta P_L + 4.7)}{B} \times 10^{12} = \frac{\Delta P_L(0.62\Delta P_L + 4.7)}{7.07\Delta P_L^{2.26} \times 10^{16}} \times 10^{12}[kg/s](R32\text{の場合})$$

差圧	ΔP_a	MPa	1.05	1.35	1.90
弁係数	B	$1/m^3$	7.90×10^{16}	13.9×10^{16}	30.2×10^{16}
計算漏れ質量流量	G_L	kg/s	7.12×10^{-5}	5.36×10^{-5}	3.70×10^{-5}

差圧		ΔP_a	MPa	1.05	1.35	1.9
実測漏れ量	SC=5℃狙い	G_L	kg/s	1.77×10^{-5}	1.50×10^{-5}	1.20×10^{-5}
	SC=15℃狙い			1.78×10^{-5}	1.54×10^{-5}	1.23×10^{-5}
計算漏れ質量量		G_L	kg/s	7.12×10^{-5}	5.36×10^{-5}	3.70×10^{-5}
実測/計算値	SC=5℃狙い	-	-	25%	28%	32%
	SC=15℃狙い	-	-	25%	29%	33%

参考表 1-11　金属弁における計算漏えい量と実測漏えい量の比較

【手順1.弁係数Bの算出】

① 遮断弁に対し、空気・窒素で差圧を掛けて漏えい量を3点測定.
(二次側は大気圧，水上置換，雰囲気温度20℃前後)
今回は計測したから代表で差圧0.5MPa , 1.0MPa , 2.0MPaの値を使用して計算する.
3点の計測箇所を選ぶポイントとしては次の2点
・3点の差圧の幅は広くとる. (対数計算を行うため、幅が狭いと誤差を大きく拾う)
・冷媒漏えいの計算に使用しないような低い差圧は用いない. (不安定なため)

② 次式にて3点の弁係数Bを計算する.

$$B \cong \frac{33\Delta P_a(5\Delta P_a + 1)}{V_{a2}} \times 10^{17}[m^{-3}]$$

			記号	単位	点1	点2	点3
窒素	計算条件	差圧	ΔP_a	MPa	0.5	1.0	2.0
		漏れ体積(水上置換)	V_{a2}	cm^3/min	200	320	750
	計算値	弁係数	B	$1/m^3$	2.89×10^{16}	6.19×10^{16}	9.68×10^{16}

③ **参考図1-4**に示す弁係数Bのm乗近似曲線を作るため,
②で計算した差圧ΔP_aと弁係数Bを用いてmを計算する.
3点のデータに対し，基準とする差圧がΔP_{a0}ともう1点の差圧ΔP_a組合わせとして，
3!/2=3パターン計算できるため，それを平均化する.
mの計算式

$$m = \log_{\frac{\Delta P_a}{\Delta P_{a0}}} \frac{B}{B_0}$$

ΔP_{a0}	ΔP_a	m
0.5MPa	1.0MPa	1.10
0.5MPa	2.0MPa	0.87
1.0MPa	2.0MPa	0.65
平均		0.87

基準点をΔP_{a0}=1.0MPaとした場合の弁係数Bは以下になる.

$$B = B_0\left(\frac{\Delta P_a}{\Delta P_{a0}}\right)^m$$

$$B = 6.19{P_a}^{0.87} \times 10^{16}[1/m^3]$$

記号	単位	基準の値
ΔP_{a0}	MPa	1.0
B_0	$1/m^3$	6.19×10^{16}
m	-	0.87

【手順2液冷媒漏えい量の算出】

前述で求めた弁係数Bを以下の式に代入し，想定される冷媒漏えい量を求める.

$$G_L = \frac{\Delta P_L(0.62\Delta P_L + 4.7)}{B} \times 10^{12} = \frac{\Delta P_L(0.62\Delta P_L + 4.7)}{6.19\Delta P_L^{0.87} \times 10^{16}} \times 10^{12}[kg/s](R32\text{の場合})$$

差圧	ΔP_a	MPa	1.05	1.55	1.95
弁係数	B	$1/m^3$	6.46×10^{16}	9.07×10^{16}	11.1×10^{16}
計算漏れ質量流量	G_L	kg/s	8.70×10^{-5}	9.67×10^{-5}	10.4×10^{-5}

差圧		ΔP_a	MPa	1.05	1.55	1.95
実測漏れ量	SC=5℃狙い	G_L	kg/s	4.76×10^{-5}	5.63×10^{-5}	6.82×10^{-5}
	SC=15℃狙い			4.75×10^{-5}	5.57×10^{-5}	6.94×10^{-5}
計算漏れ質量流量		G_L	kg/s	8.70×10^{-5}	9.67×10^{-5}	10.4×10^{-5}
実測/計算値	SC=5℃狙い	-	-	55%	58%	66%
	SC=15℃狙い	-	-	55%	58%	67%

【ガス冷媒漏えい】

液冷媒漏えいと同様にガス冷媒漏えいの検討を行った.

一次側から気相であるため式(2)において，$Z_{UL}=0$ となり式(4)と式(5)が適用できる．ガス冷媒は添え字 G を用い表すと，式(4)は式(29)式(30)となる．式(30)に式(6)を代入すると，ガス冷媒の漏れ量は式(31)となる.

$$\Delta P_G = \alpha_G Z\left(\frac{dp}{dz}\right)_{G1'} + (1-\alpha_G)Z\left(\frac{dp}{dz}\right)_{G2'} \quad ・・・(29)$$

$$\Delta P_G = \alpha_G Z\frac{12}{\pi D\delta^3}\mathrm{G}_G\nu_{G1} + (1-\alpha_G)Z\frac{12}{\pi D\delta^3}\mathrm{G}_G\nu_{G2} \quad ・・・(30)$$

$$G_G = \frac{\Delta P_G}{B\{\alpha_G\nu_{G1} + (1-\alpha_G)\nu_{G2}\}} \quad ・・・(29)$$

ガス冷媒漏えい量の式(31)に式(9)を適用すると式(32)になる.

$$G_G = \frac{\Delta P_G}{B\left\{\frac{\nu_{G2}}{\nu_{G1}+\nu_{G2}}\nu_{a1} + (1-\frac{\nu_{G2}}{\nu_{G1}+\nu_{G2}})\nu_{G1}\right\}} = \frac{\Delta P_G}{G_G\frac{2\nu_{G1}\nu_{G2}}{\nu_{G1}+\nu_{G2}}}$$

$$G_G = \frac{\Delta P_G(\nu_{G1}+\nu_{G2})}{2B\nu_{G1}\nu_{G2}} \quad ・・・(32)$$

参考表 1-12 に示すように，色つきの物性値を与えれば計算が可能となる.

参考表 1-13 にこれらの物性値を Refprop9.1 により与えて計算した結果と平行平板漏れシミュレーションの結果との比較を示す.

参考表 1-12　ガス冷媒漏えい量G_Gに関わる物性

式	記号	名称	説明
$G_G = \frac{\Delta P_G(\nu_{G1}+\nu_{G2})}{2B\nu_{G1}\nu_{G2}}$	ΔP_G	ガス冷媒漏えい差圧	設定差圧
	ν_{G1}	ガス冷媒一次側動粘性係数	ガス冷媒一次側の物性
	ν_{G2}	ガス冷媒二次側動粘性係数	ガス冷媒大気圧の物性

参考表 1-13　Refprop9.1 の物性とガス媒漏えい量の式を用いた計算結果とシミュレーションの結果比較

差圧	MPa	0.80	1.00	1.12	1.25	1.55
シミュレーション結果	kg/s	7.86×10^{-6}	8.60×10^{-6}	8.59×10^{-6}	1.01×10^{-5}	1.04×10^{-5}
モデル式の結果	kg/s	7.94×10^{-6}	8.65×10^{-6}	8.69×10^{-6}	1.01×10^{-5}	1.06×10^{-5}

物性値を適切に与えれば，シミュレーションとほぼ同一の結果となることは確認できた.

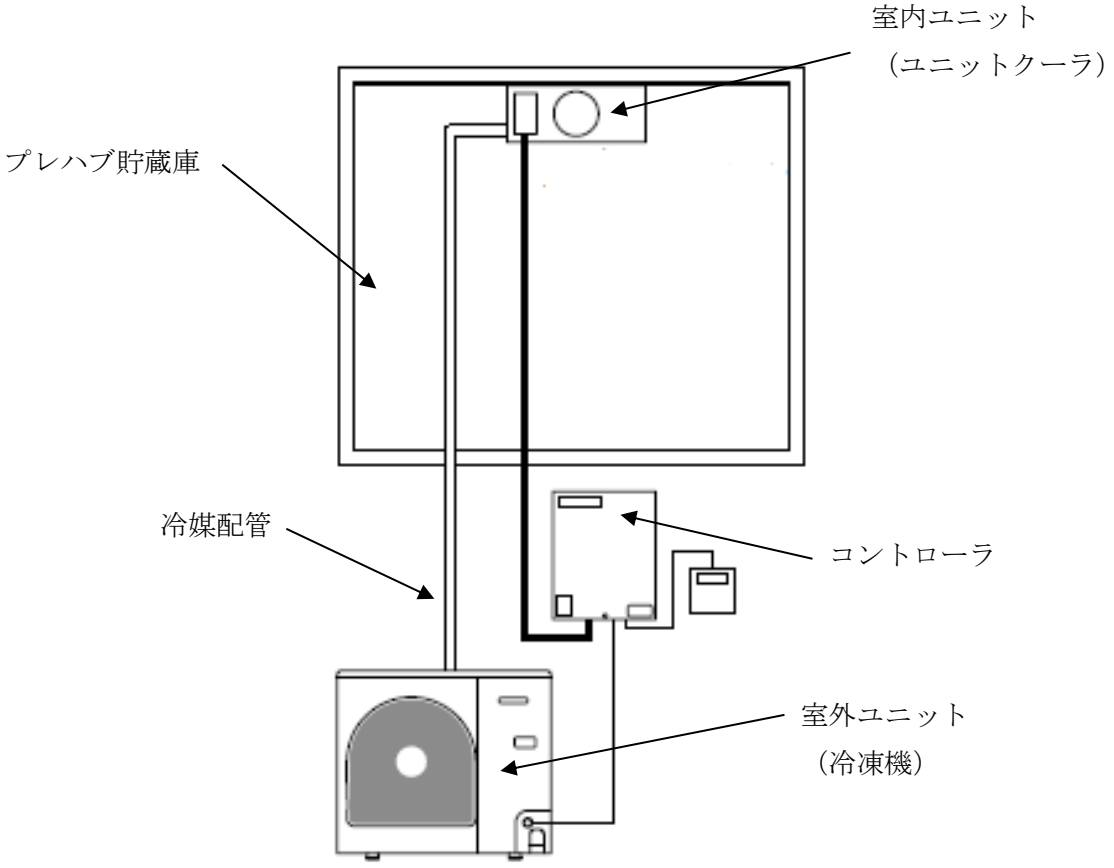
ガス冷媒の場合は，漏えい総量として液冷媒よりはるかに小さいため，物性値のモデル式の導入等の検討は行わない.

参考資料２　冷凍冷蔵ユニットの安全確保について

今回適用外とした冷凍冷蔵ユニットについての検討状況を記載する．

１．　微燃性冷媒使用のリスクアセスメント対象範囲

冷凍冷蔵ユニットは，主にプレハブ貯蔵庫を保冷するための製品であり，その形態はセパレート形と一体形（天置き形，壁貫通形等）がある．今回は，出荷台数の多い 3 馬力以下のセパレート形を対象として RA を実施した．（セパレート形の全出荷台数のうち，3 馬力以下機種の出荷台数は，80%以上を占める．）また，プレハブ貯蔵庫の保冷を目的とした機器は，ユニットクーラとコンデンシングユニットを組み合わせたシステムがある．このシステムは，冷凍冷蔵ユニットよりも出荷台数が多い（冷凍冷蔵ユニットの約 1.8 倍）ため，双方の機器に適用できる安全対策を検討する必要があった．



参考図 2-1　セパレート形冷凍冷蔵ユニット概略図

２．　着火源の想定

冷凍冷蔵ユニットの着火源は，基本的に別置ショーケースやコンデンシングユニットと同等であるが，荷物運搬用フォークリフトの爪によるスパークや冷却器異常着氷溶解のためのろう付けバーナー，プレハブ庫内の明かり用としてのライターが追加される．また，除霜を電気ヒータで行う場合もあり，除霜用ヒータの表面温度調査も必要であった．

参考表 2-1　冷凍冷蔵ユニットの着火源想定

		着火源	着火		備考
			別置SC	プレハブ	
スパーク （可燃空間中で発生）	喫煙器具	マッチ	○	○	
		石油ライター	○	○	
		電子ライター	×	×	ｽﾊﾟｰｸで着火しない
	電気部品	電化製品（火災原因）	○	○	漏電ｽﾊﾟｰｸ
		家電製品、小型電気機器	×	○	5kVA以下（加湿器、集塵機等）
		機器内電気製品	○	○	5kVA以上の電磁接触器他
		電源コンセント	×	×	
		照明スイッチ	×	×	
	作業ツール	金属スパーク（ﾌｫｰｸﾘﾌﾄ爪）	×	○	ﾌﾟﾚﾊﾌﾞは可能性有り
		電動工具	○	○	電気ドリル等
		冷媒回収機	×	×	容量小
	人体	人体からの静電気	×	×	最小着火ｴﾈﾙｷﾞｰ以下
裸火 （可燃空間中と接触）	喫煙器具	マッチ	○	○	着火＝裸火
		石油ライター、電子ライター	○	○	着火した裸火から
	燃焼機器	燃焼式暖房器	○	○	着火＝裸火
		燃焼式給湯器	○	○	着火＝裸火
		燃焼式ボイラー	○	○	着火＝裸火
		燃焼式調理器	○	○	着火＝裸火
	作業ツール	溶接器バーナー	○	○	着火＝裸火。ﾌﾟﾚﾊﾌﾞの場合、ﾊﾞｰﾅｰは溶接だけでなく、冷却器氷結融解にも使用
		石油ライター、電子ライター	－	○	明かり用
温度 （可燃空間中と接触） ※表面温度700℃以上	電気部品	除霜ヒータ	×	○	調査が必要 （表面温度が700℃以下か？）

（○：着火の可能性あり，×：着火の可能性なし）

３．安全対策について

プレハブ貯蔵庫は，密閉空間になることやセパレート形冷凍冷蔵ユニットの冷媒封入量を考慮すると庫内で冷媒が漏えいした場合，庫内は必ず可燃領域となり，安全対策が必要である．また安全対策も遮断弁による対策だけでは，弁漏れ量（300cm^3/min 程度）を想定すると不十分であり，換気装置等の安全対策が必要である．換気装置等の安全対策は，プレハブ貯蔵庫側に設置する必要があるため，冷凍冷蔵ユニットやユニットクーラの機器メーカだけでなく，プレハブ貯蔵庫の躯体（パネル）を製造するパネルメーカも含めた対応が必要となる．

参考表 2-2　冷凍用プレハブ貯蔵庫（パネル厚さ 100mm）の限界冷媒封入量

坪数	適用機器（目安）	外寸（m）		漏れ高さ（m）	限界（LFL/4）冷媒封入量（kg）		
		幅	奥行		R32	R1234yf	R1234ze（E）
1	2HP	1.8	1.8	1.8	0.35	0.33	0.35
1.5	2～3HP	2.7	1.8	1.8	0.55	0.52	0.55
2	3～4HP	3.6	1.8	1.8	0.75	0.71	0.74

４．冷凍冷蔵ユニットのリスクアセスメントを進める上での課題

冷凍冷蔵ユニットの RA を進める上で解決しなければならない課題は次のとおりである．

1) プレハブ貯蔵庫は，冷凍冷蔵ユニット（又はユニットクーラ）と躯体（パネル）の組み合わせであり，それぞれそれを扱うメーカは異なる．前述したが，プレハブ貯蔵庫の安全対策は，換気装置等が必要となるため，パネルメーカの協力が必要不可欠である．しかしプレハブ貯蔵庫工業会は 2009 年に解散しており，現段階では業界を纏める組織が存在しておらず協力を依頼出来ない．

2) 安全対策となる換気装置等においては，設置環境が低温や結露条件となり装置の信頼性確保が困難である．

3) プレハブ貯蔵庫自体，小形のものであればホームセンター等でも販売されており，少しの製品知識があれば，容易に据付けが可能である．例え，冷凍冷蔵ユニットの安全ガイドラインを発行したとしてもその内容を周知徹底できる可能性は極めて低いと考えられる．

５． 検討状況まとめ

冷凍冷蔵ユニットの RA は，他製品とは異なり，機器メーカだけで検討を進める状況ではないこと，プレハブ貯蔵庫の商流自体を見直す必要があることなどから，現段階では微燃性冷媒使用時の安全を担保することはできないと判断した．

参考資料３　コンデンシングユニットの微燃性（A2L）冷媒適用範囲

コンデンシングユニットに，微燃性冷媒が使用できるかを検討するにあたり，各社のコンデンシングユニットの使用用途データを収集・分析し，ショーケース，冷凍冷蔵倉庫，その他の 3 区分の割合を算出した．

参考表 3-1　コンデンシングユニットの使用用途割合

用途	構成比(%)
(1)ショーケース	45
(2)冷凍冷蔵倉庫	44
(3)その他	11

次に，それぞれの用途毎に微燃性冷媒が使用可否の RA が実施可能かの検討を行った．

(1) ショーケース

ISO5149：2014 に準拠すると，R32 の冷媒充てん量上限が約 60kg となることもあり，店舗形態毎に RA の実施可否を検討した．その結果，大規模店舗や中規模店舗は，冷媒量が 60kg を超える製品が納入されることから RA が困難と判断した．また，大規模店舗や中規模店舗は，コンデンシングユニットとショーケースを接続する連絡配管は店舗床下ピット内に敷設されるが，ピット内には複数系統の配管が通るため，ガス漏れが発生した際に漏れた系統の特定が難しく復旧までに時間を要することも微燃性冷媒には適していないと考える．従って，これらの問題のない小規模店舗のみが RA 対象となる．

参考表 3-2　店舗コンデンシングユニットの使用用途割合

	構成比 (%)	連絡配管		検討結果
		ﾋﾟｯﾄ内	ｼｮｰｹｰｽ上部	
大規模店舗 (総合ｽｰﾊﾟｰ)	20	100	0	冷媒量が 60kg を超える製品が納入されること，ﾋﾟｯﾄ内には複数系統の配管が敷設されるため，ﾋﾟｯﾄ内でｶﾞｽ漏れ発生時に漏れた系統の特定が難しいことから RA 困難.
中規模店舗 (小規模ｽｰﾊﾟｰ，ﾄﾞﾗｯｸﾞｽﾄｱ)	30	100	0	
小規模店舗 (小規模小売店舗，ｺﾝﾋﾞﾆｴﾝｽｽﾄｱ)	50	20	80	冷媒量は 60kg 以下．系統も複数ないため RA 可能.

(2) 冷凍冷蔵倉庫

プレハブ貯蔵庫が主となるが，前項に詳細を記載したとおり，RA が困難と判断.

(3) その他

理化学機器や半導体製造設備等に使用されるが，負荷側の設置環境及び使用環境が把握できないため，RA 実施が困難.

以上より，微燃性冷媒の使用可否が検討できるのは，「ショーケース用 45%」のうちの「小規模店舗 50%」の約 20%となる．

参考文献

2-1) Risk Assessment of room air conditioning using R290, JRAIA, 1999

2-2) W. Goetzler, L. Bendixen, P. Bartholomew, “Risk Assessment of HFC-32 and HFC-32/134a (30/70 wt. %) in Split System Residential Heat Pumps, Arthur D. Little. inc., United State, 1998

2-3) ISO/IEC Guide51:2014, Safety aspects - Guidelines for their inclusion in standards, 2014

2-4) 中條，中央大，「人間信頼性工学：エラー防止への工学的アプローチ」，2008

2-5) 日科技連 R-Map 実践研究会，日科技連出版社「R-Map とリスクアセスメント 手法編(下)」，2014

3-1) 微燃性冷媒を使用したビル用マルチエアコンのリスク評価報告書，2017

3-2) フルオロカーボンガス HFC-32 の MSDS （ダイキン工業㈱）
(https://www.daikin.co.jp/chm/products/pdf/catalog/HFC-32.pdf)

4-1) 公益社団法人 日本冷凍空調学会 微燃性冷媒リスク評価研究会平成 26 年度プログレスレポート，2014

4-2) IEC 60335-2-40 61D/386/FDIS:2017, Household and similar electrical appliances-Safety-Part 2-40: Particular requirements for electrical heat pumps, air-conditioners and dehumidifiers,2016

6-1) 微燃性冷媒を使用した店舗用パッケージエアコンのリスク評価報告書，2017

7-1) 内閣府資料，“規制改革に関する答申～経済再生への突破口～”，2013.6.5，p. 35. (http://www8.cao.go.jp/kisei-kaikaku/kaigi/publication/p_index.htm)

7-2) 内閣府資料，“規制改革会議実施計画平成 25 年 6 月 14 日 閣議決定），2013.6.14，p. 18
（http://www8.cao.go.jp/kisei-kaikaku/kaigi/publication/130614/item1.pdf）

7-3) 経済産業省資料，“平成 25 年度 高圧ガス保安対策事業（冷凍機等への可燃性冷媒再充てんの安全性評価）報告書”，E004025，2014.6.9 (http://www.meti.go.jp/meti_lib/report/2014fy/E004025.pdf)

7-4) 経済産業省資料，“平成 26 年度経済産業省委託 高圧ガス保安対策事業（高圧ガス保安技術基準作成・運用検討）③冷凍保安規則関連 冷凍機等への可燃性冷媒再充塡の安全性評価 報告書”，E005264，2015.8.14
(http:://www.meti.go.jp/meti_lib/report/2015fy/000611.pdf)

7-5) 経済産業省資料，“平成 27 年度 高圧ガス保安対策事業（高圧ガス保安技術基準作成・運用検討）（1）冷凍保安規則関連 1）冷凍機等への可燃性冷媒再充塡の安全性評価 報告書”，E005639，2016.4.25
(http://www.meti.go.jp/meti_lib/report/2016fy/000117.pdf)

7-6) 経済産業省告示第 32 号，“製造施設の位置，構造及び設備並びに製造の方法等に関する技術基準の細目を定める告示（昭和 50 年通商産業省告示第 291 号）の一部を改正する告示”，2016.2.26
(http://www.meti.go.jp/policy/safety_security/industrial_safety/oshirase/2016/02/280226-2-1.pdf)

7-7) 経済産業省告示第 269 号，“製造施設の位置，構造及び設備並びに製造の方法等に関する技術基準の細目を定める告示及び高圧ガス保安法施行令関係告示の一部を改正する告示”，2016.11.1
(http://www.meti.go.jp/policy/safety_security/industrial_safety/oshirase/2016/11/281101-2-1.pdf)

7-8) 経済産業省令第 105 号，“容器保安規則等の一部を改正する省令”，2016.11.1
(http://www.meti.go.jp/policy/safety_security/industrial_safety/oshirase/2016/11/281101-1-1.pdf)

7-9) “一般高圧ガス保安規則の機能性基準の運用について等の一部を改正する規程”，2016.11.1
(http://www.meti.go.jp/policy/safety_security/industrial_safety/oshirase/2016/11/281101-4.pdf)

7-10) “一般高圧ガス保安規則の機能性基準の運用について等の一部改正等について （ファスト・トラック制度の運用 開始について）”，2016.10.3
(http://www.meti.go.jp/policy/safety_security/industrial_safety/oshirase/2016/10/281003.html)

参-1) 冷凍空調学会論文集 2010-No.2 P169「二酸化炭素冷凍サイクル用膨張機内の漏れ流動特性」

参-2) 公益社団法人冷凍空調学会 日本冷凍空調学会専門書シリーズ 「冷媒圧縮機」2013.3 P14

参-3) CRC Press「Multiphase Flow Handbook」2005.9 11-13

本最終報告書作成に関与された SWG 委員，協力者及び事務局の氏名は，次のとおりである
（敬称略）

主　　査	宇野正記	日立ジョンソンコントロールズ空調株式会社
副　主　査	大谷真弘	福島工業株式会社
委　　員	大塚千明	株式会社岡村製作所
〃	畑　利希	株式会社岡村製作所
〃	阪江　覚	ダイキン工業株式会社
〃	植木基二	東芝キヤリア株式会社
〃	秋子裕幸	中野冷機株式会社
〃	佐藤知之	中野冷機株式会社
〃	小川太郎	パナソニック株式会社
〃	栗田文彦	パナソニック株式会社
〃	佐藤　誠	福島工業株式会社
〃	木下　卓	富士電機株式会社
〃	佐藤新二	富士電機株式会社
〃	小林健治	ホシザキ株式会社
〃	関　和芳	ホシザキ株式会社
〃	藤本　肇	三菱電機株式会社
〃	山下哲也	三菱電機株式会社
ｵﾌﾞｻﾞｰﾊﾞｰ	石井　裕	サンデン・アドバンストテクノロジー株式会社
〃	川瀬信義	日立ジョンソンコントロールズ空調株式会社
〃	配川知之	ダイキン工業株式会社
〃	平川　尚	株式会社鷺宮製作所
〃	福田充宏	国立大学法人静岡大学
〃	目崎丈統	ダイキン工業株式会社
〃	山口広一	東芝キヤリア株式会社
〃	山下浩司	三菱電機株式会社
事　務　局	河村治雄	一般社団法人日本冷凍空調工業会
〃	川原　忍	一般社団法人日本冷凍空調工業会
〃	長谷川一広	一般社団法人日本冷凍空調工業会