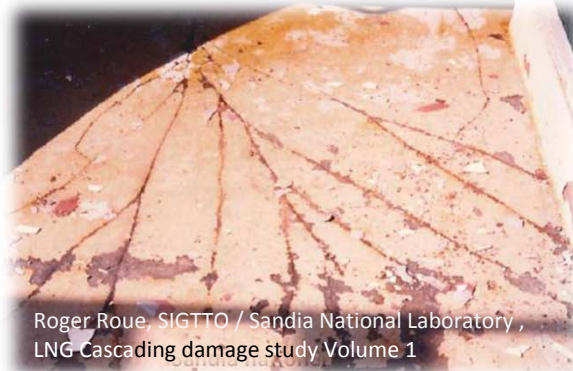


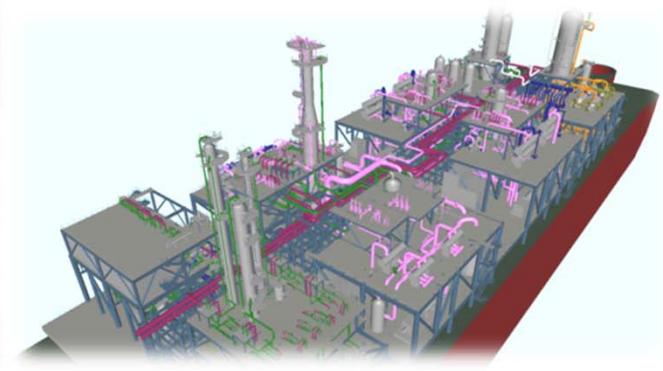
# ClassNK

R & D PROJECT

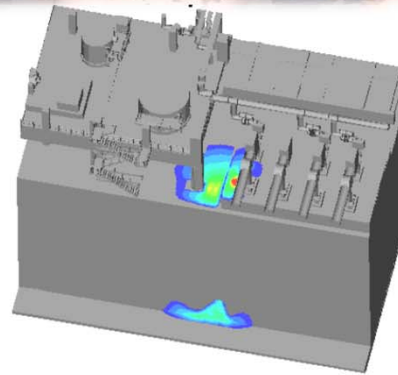
一般財団法人 日本海事協会 支援  
研究開発プログラム (2011)



Roger Roue, SIGTTO / Sandia National Laboratory,  
LNG Cascading damage study Volume 1



Source : Unknown



Source :  
Lawrence Livermore National Laboratory (1987)

2012 ClassNK 共同研究成果報告会

## FLNG向け極低温流体漏洩リスク解析と、 脆化被害軽減を目指したアレスト鋼適用の基礎的検討

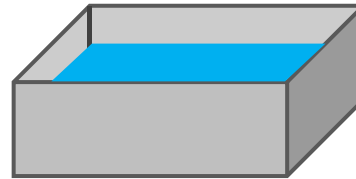
7月10日 @東京, 7月11日 @大阪  
日揮株式会社 FLNG 技術グループ 前田健策

# 動機 なぜリスク解析なのか？



漏洩対策を検討する中で生じた様々な疑問に答えること

思った通り、漏れを受け止められるのか？ **極低温流体の漏洩・拡散現象**ってどんな具合？



割れは**瞬時に発生**するのか？  
ある程度時間が掛かるのか？  
どのように伝播するのか？

**軽微な割れも許容されない**のか？  
何処までなら大丈夫なのか？

**船上で大量の液体をホールド**し、果たして本当にコントロール出来るのか？

初期の暫定案：  
陸のLNG基地用のコード(NFPA 59A)の思想に従い 船上に100m<sup>3</sup>超の集合升を用意すること。

脆化割れにより**プラント稼働停止**に至る可能性は？

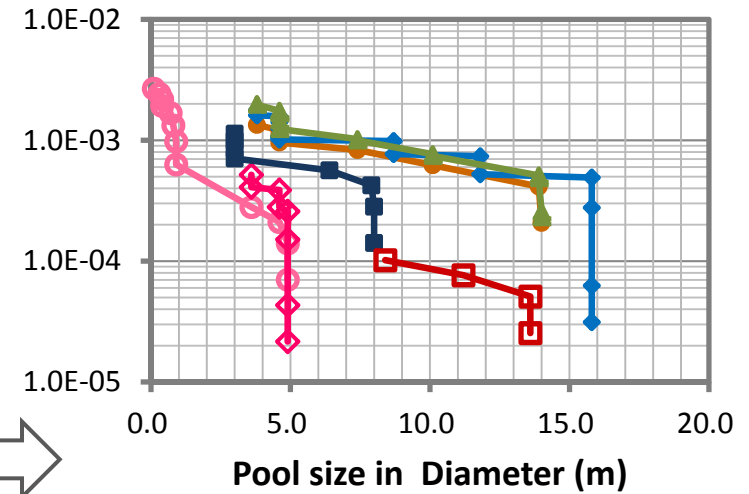
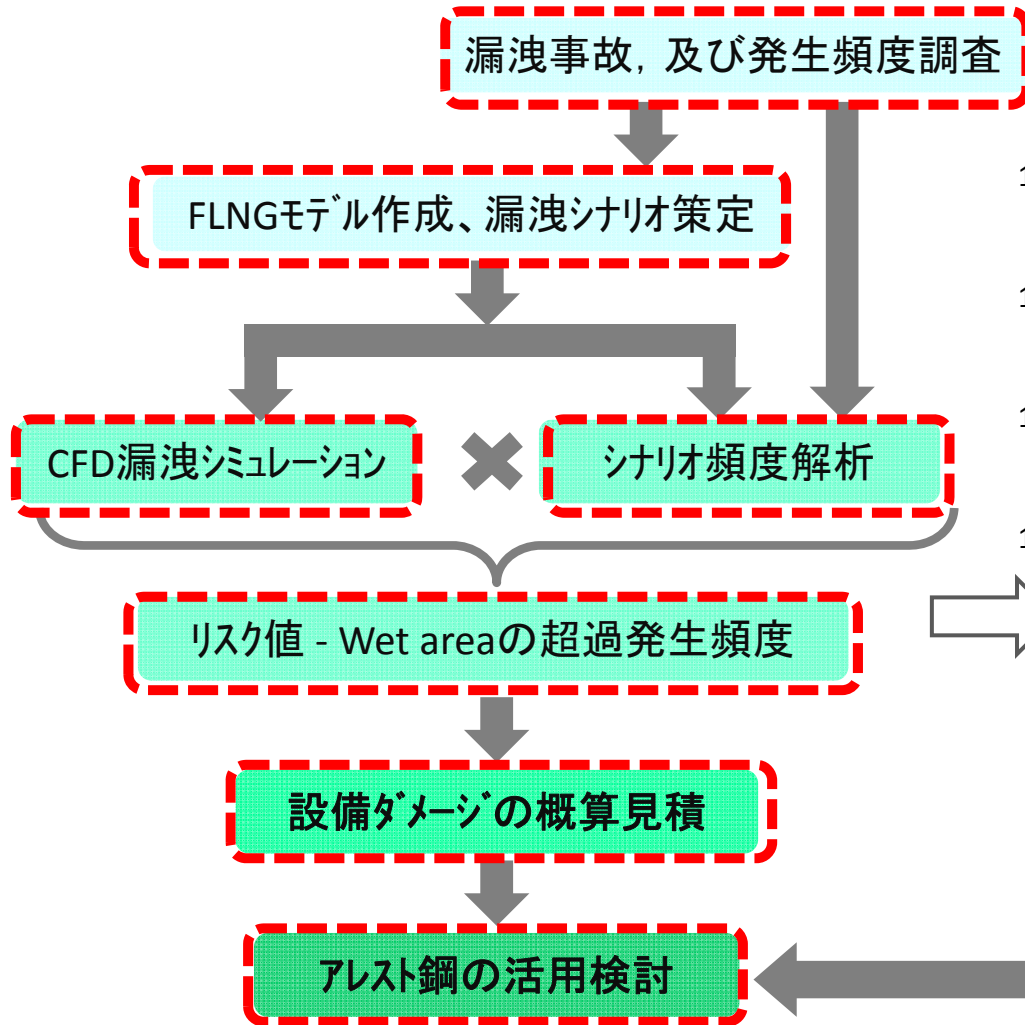


Photo : BP

極低温流体の漏洩にともない発生する**可燃性ガス**ってどれ位？ 火災・爆発リスクとの関係は？

**そもそも漏洩の発生頻度は？**

# 共同研究全体の流れ



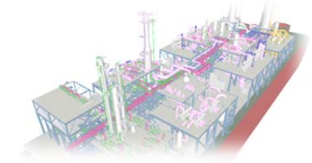
# 事故調査対象(公開情報)



目的:より現実的な漏洩シナリオの策定のため

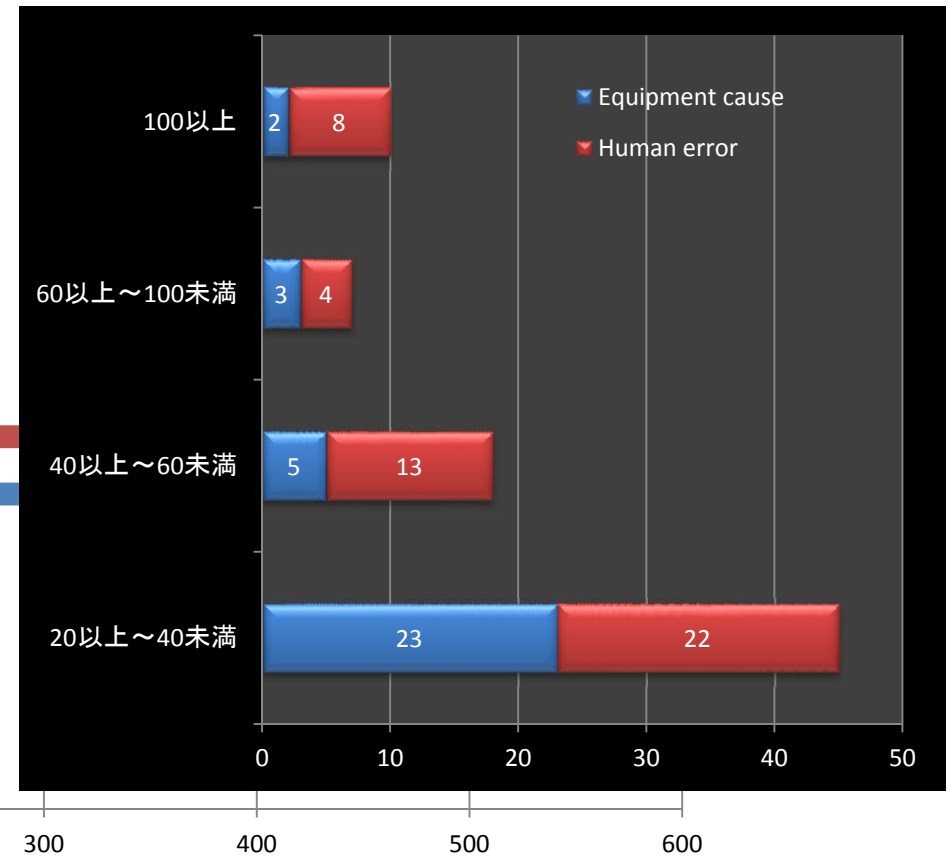
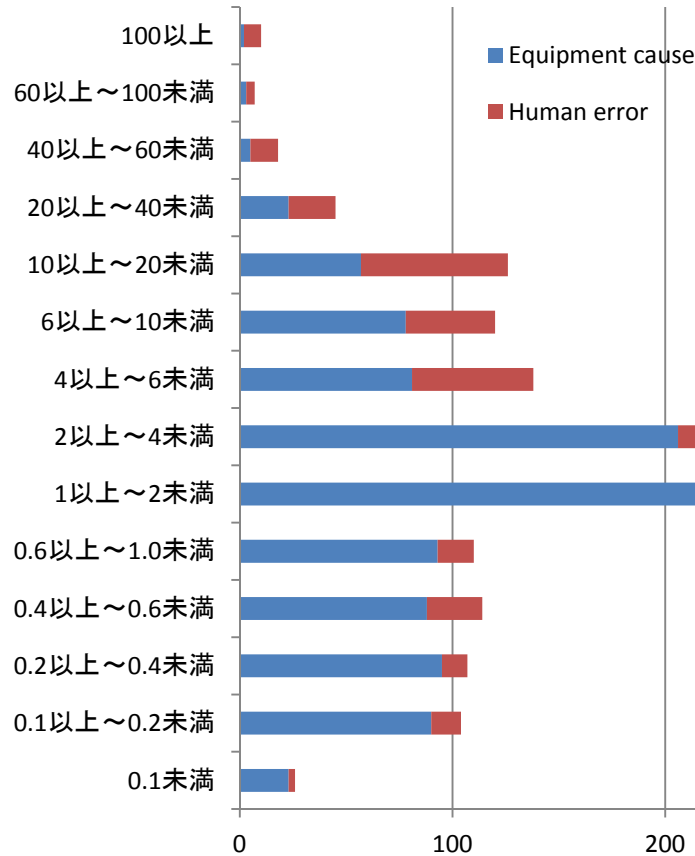
- **UK HSE Hydrocarbon Release Statistics (1992~2011)**
  - 特徴:レポートデータ種 70種以上。母集団大、高精度、漏洩頻度では産業界のデファクトスタンダード的データベース, ソースは原油、パイプラインガス等アップストリーム、設備はwell head platform, drilling rig, FPSO,等
- **国内LNG受入基地ヒアリング(電気・ガス・高圧ガス事業法)**
- **LNG荷役請負業**
- **経済産業省 高圧ガス事故事例データベース(1965-2011)**
- **その他 各種専門誌、国際会議資料など**





# UK HSE HCR 開口の等価穴径情報

## 例) 漏洩等価穴径の分布傾向



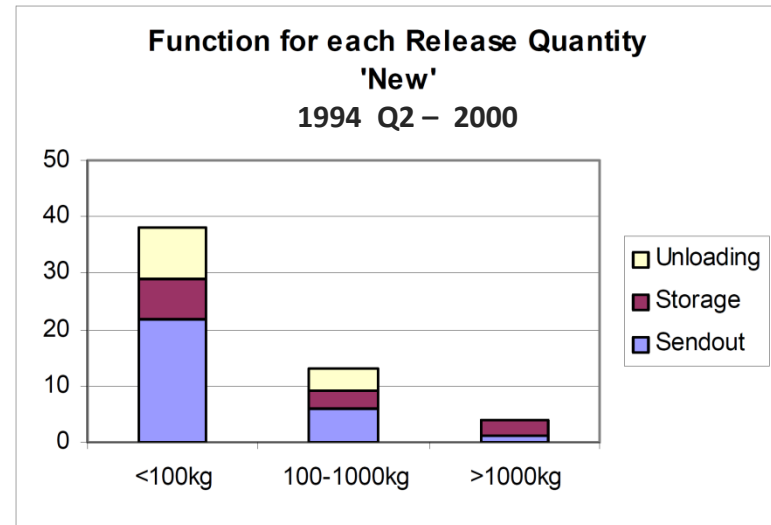
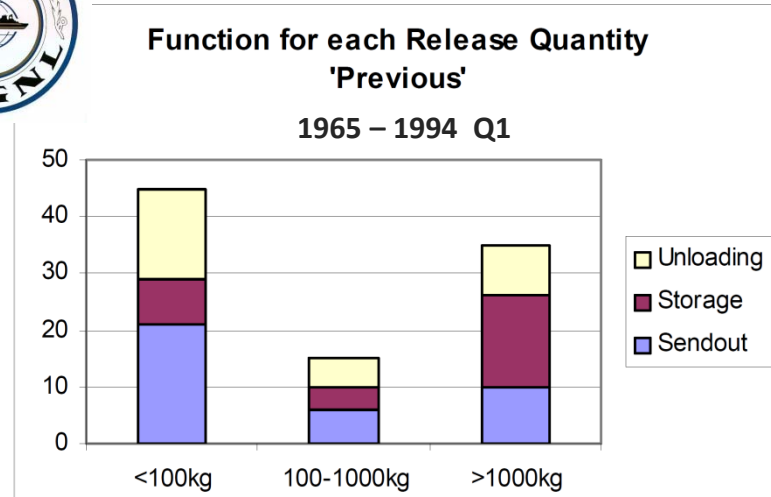
検索条件: 母集団 UK HSE 2001 1Q～2008 1Q, FLNGに無関係なDrilling, Pipeline関連のシステム、機器排除、漏洩理由としてcryogenic fluidに無関係な腐蝕・浸食由来を排除

# 漏洩件数の変遷



Source GIGNL @LNG14, Doha (2004)

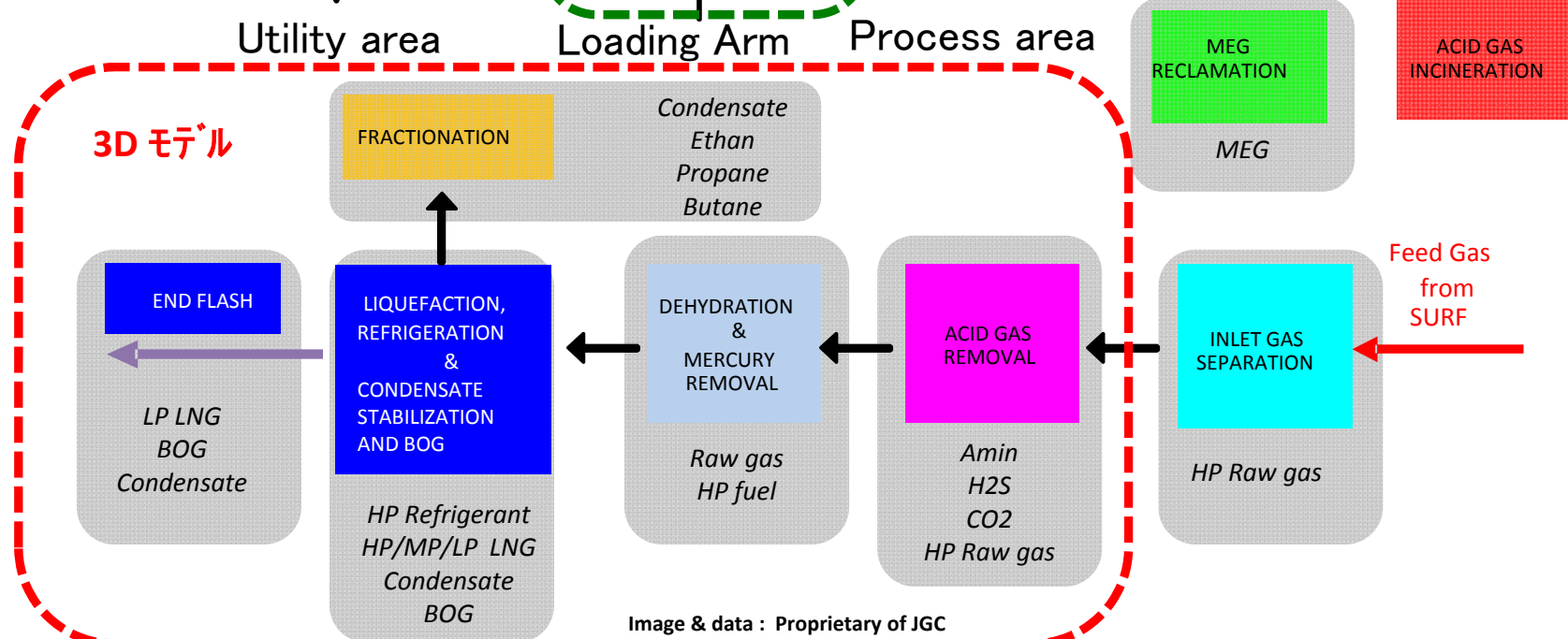
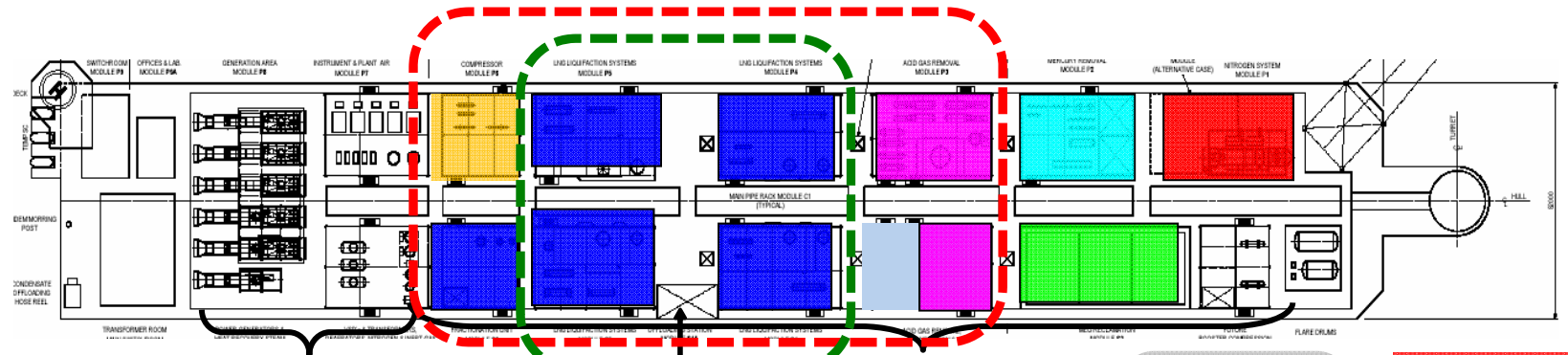
Year	全体	40mm以上+機器に関係有り
1992	40	4
1993	238	19
1994	339	22
1995	220	13
1996	217	23
1997	225	14
1998	228	17
1999	235	8
<b>Subtotal 1992-1999: 120</b>		
2000	264	4
2001	251	1
2002	242	6
2003	242	2
2004	273	1
2005	224	3
2006	190	2
2007	183	11
2008	33	1
<b>Subtotal 2000-2008: 31</b>		
	<b>3644</b>	



# 解析対象のFLNG



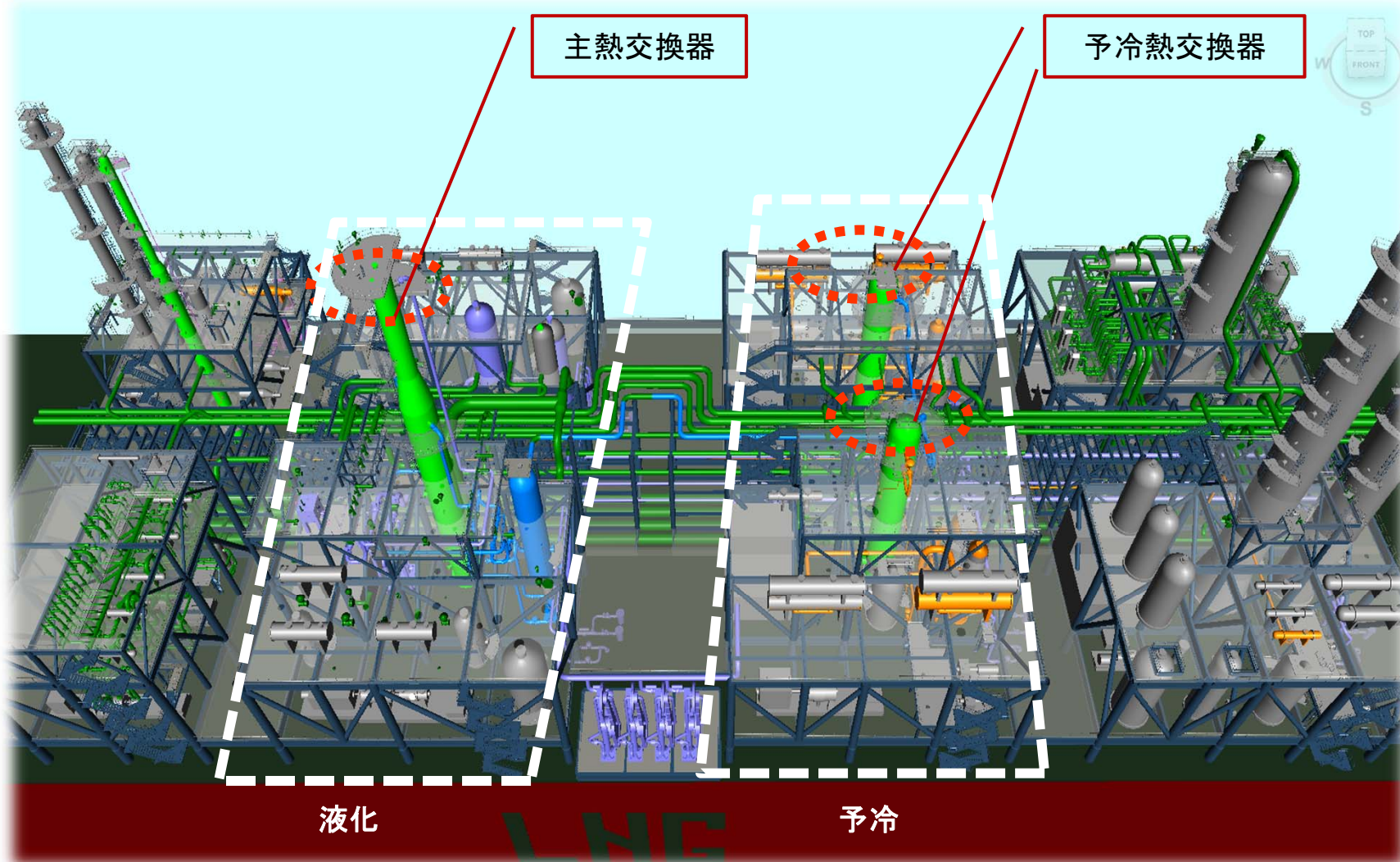
## 液化プロセス > APCI社 DMR Dual Mixed Refrigerantプロセス



# 解析対象のFLNG



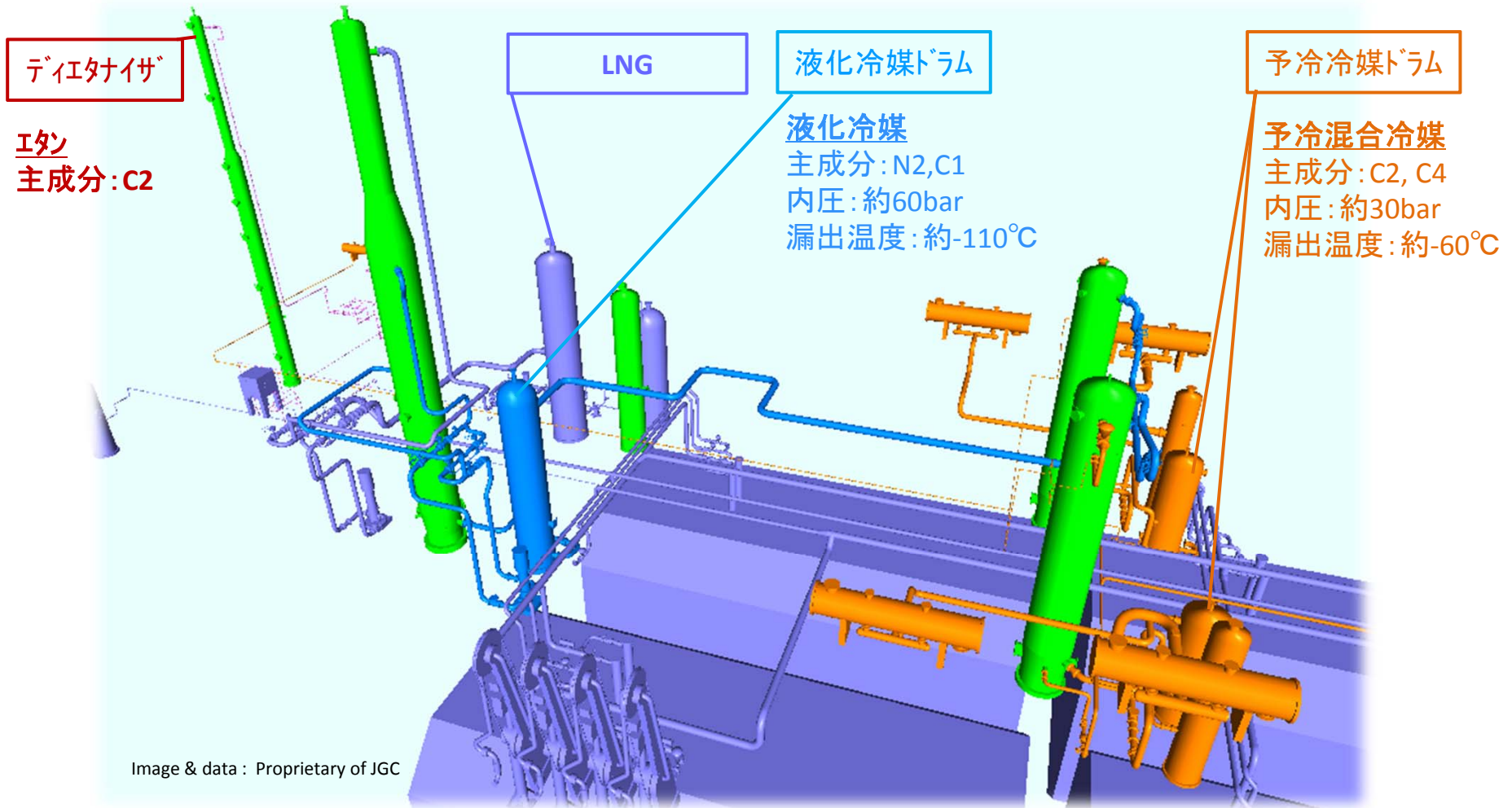
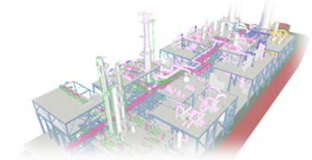
出荷はローディングアーム、プロセスデッキは板張り、LNGタンクはSPBを想定





# 解析対象FLNGに於ける、極低温流体の所在

ガス組成・温度・圧力の様々な組合せ、最大数10bar



# 各セグメントに於ける漏洩シナリオ パラメータ



例)セグメント #6,7

**Identifying the point of Leak**

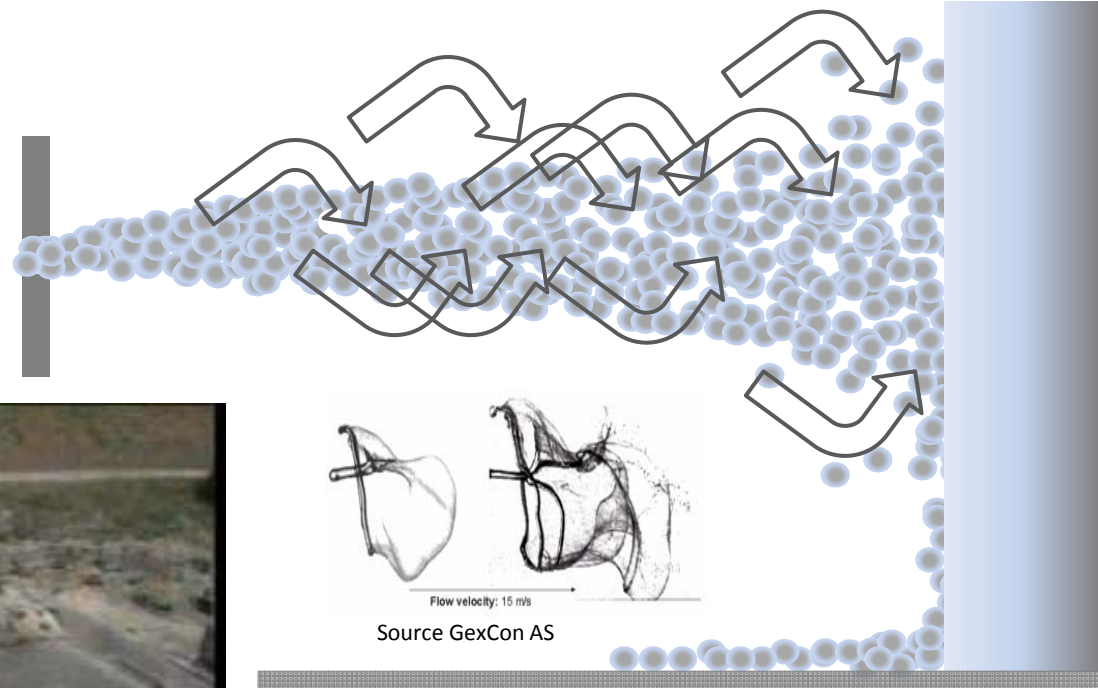


Segment #	Material	Relevant modules	Target Deck	Leak height (Location)	Hole dia	Pressure	leak direction	Total Nos simulation
6	CMR	M9	Process Dk.	1m	5mm	60bar	-z	6
				15m	10mm			
					20mm			
7	CMR	M9	Process Dk.	1m	5mm	60bar	-z	9
				5m	10mm			
				16m	20mm			
				3	3	1	1	9



# 高圧の極低温流体の漏出現象 フラッシングジェット

ガス: 液化プロパン、放出穴径 25mm、貯蔵容器圧力 7.5bar

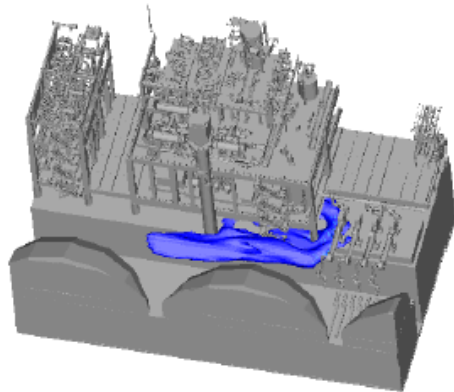


Source INERIS, FLIE Project

# 障害物有り(機器・配管・構造)CFD解析の出力例



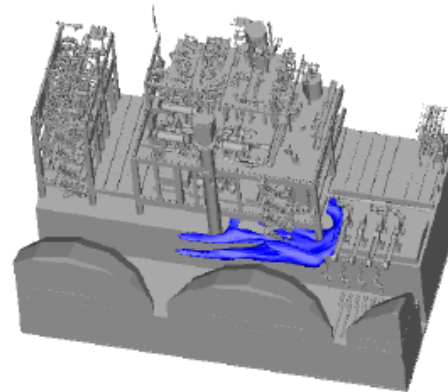
Vapor



$\geq 2 \text{ vol\%}$

Job=019919, Var=KVAP (/log10), Time= 65.006 (s)  
X=163 : 249.5, Y=-59.5 : -10.5, Z=17 : 77 m

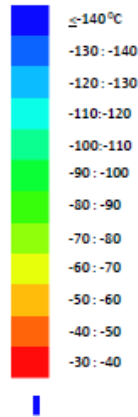
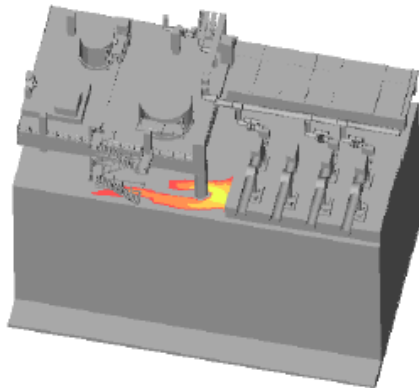
Aerosol



$\geq .004 \text{ vol\%}$

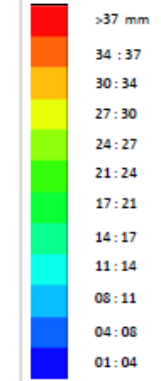
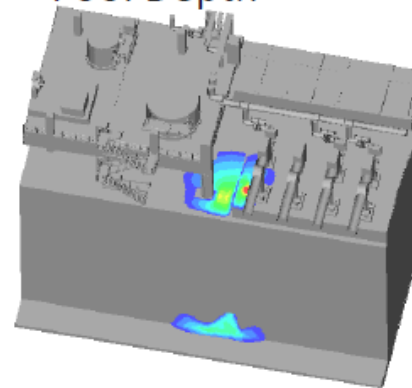
Job=019919, Var=XUSER (/log10), Time= 65.006 (s)  
X=163 : 249.5, Y=-59.5 : -10.5, Z=17 : 77 m

Temperature



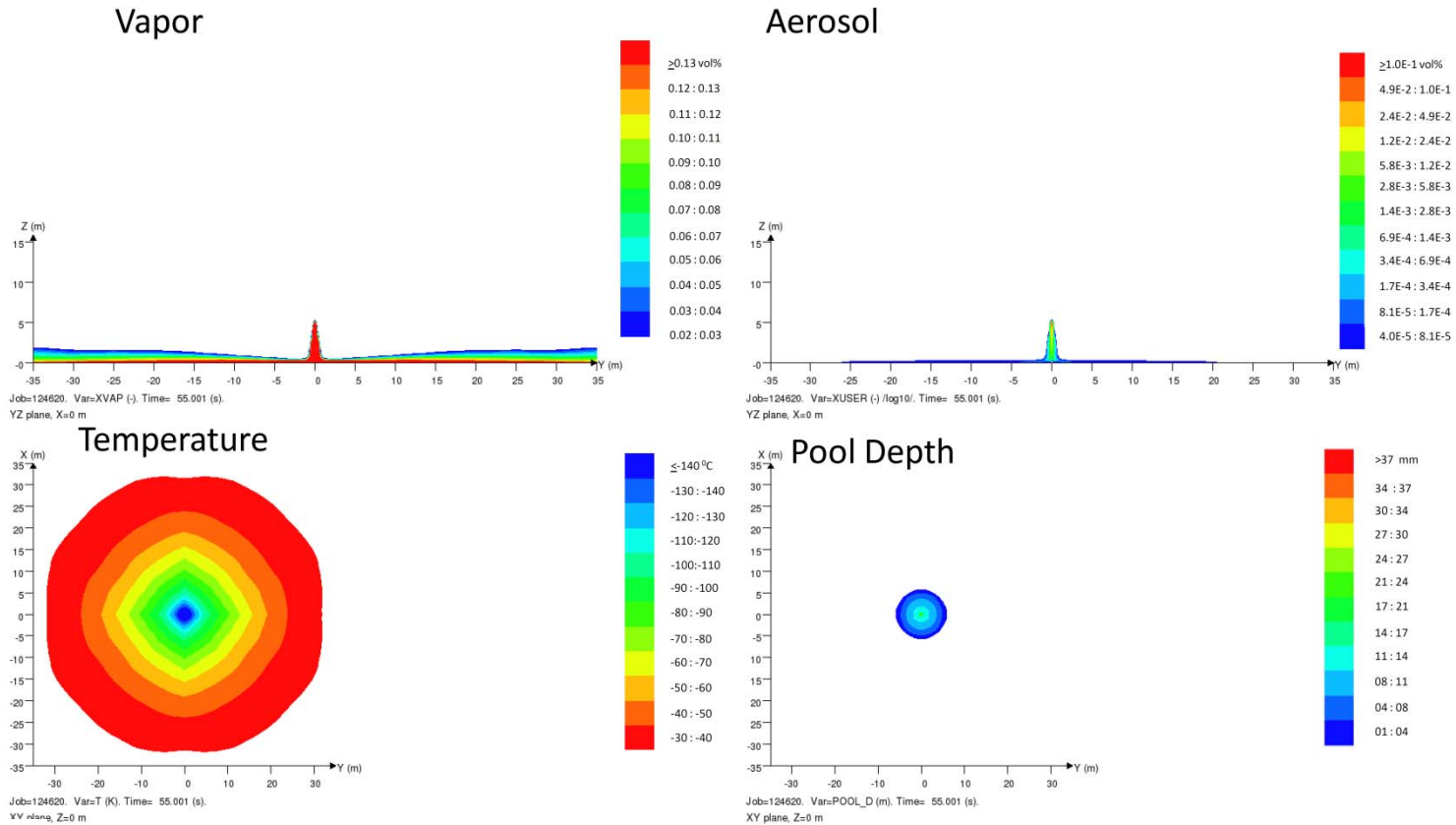
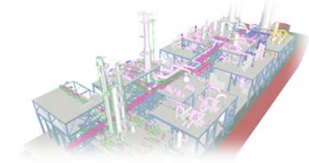
Job=019919, Var=T (K), Time= 65.006 (s)  
X=206 : 247, Y=-43.7 : -21, Z=17 : 47 m

Pool Depth



Job=019919, Var=POOL\_D (m), Time= 65.006 (s)  
X=206 : 247, Y=-43.7 : -21, Z=17 : 47 m

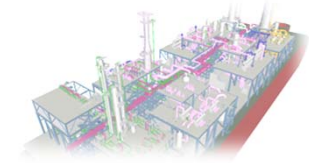
# 出力例 障害物無(機器・配管・構造等)



## Case #124620

Released Species: LNG	Aerosol VF: 15%	Release Diameter: 50 mm
Release Height: 5 m	Atmospheric Temp: 29 C	Pressure: 3.5 Barg
Wind Speed: 0 m/s	Wind Direction: N/A	Rainout: 29.4%

# CFD拡散解析結果

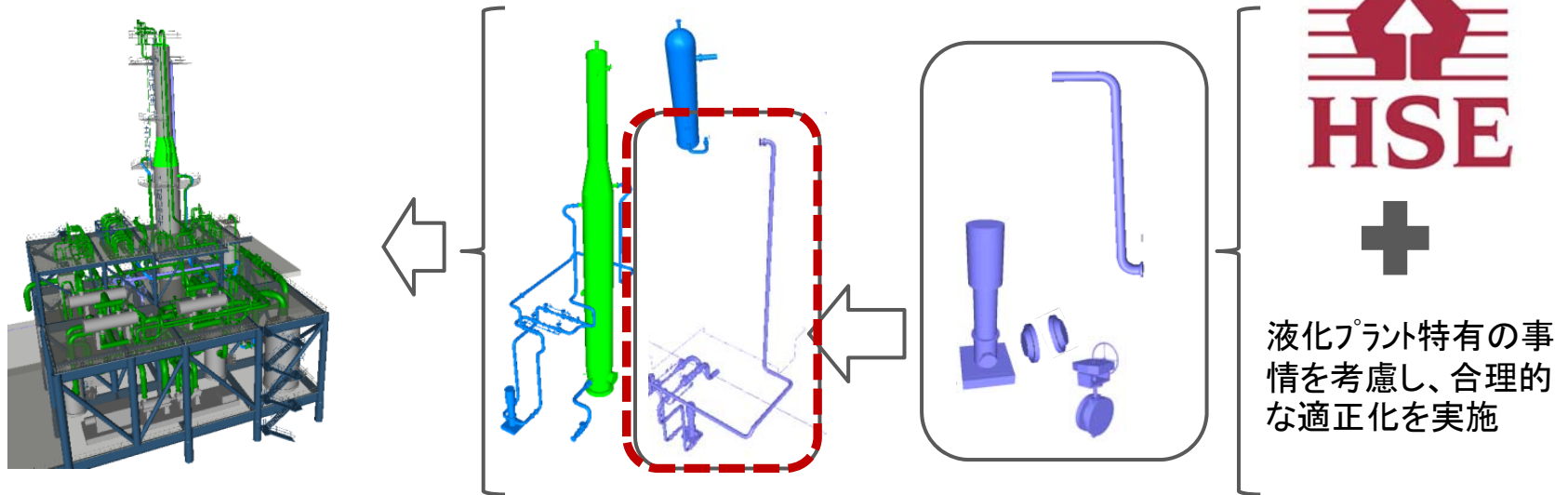


例) 液溜まりが形成された漏洩シナリオは低所から漏洩のみ

np : No Pool formed

Material	P (barg)	Equiv. Hole (mm)	Height (m)	→↓	GexCon Run #	max rainout % at peak	Pool Dia(m)				
							0.5min	1min	3min	10min	
LNG	3.5	20	2	-z	<a href="#">123610</a>	pool	24.5%	3.6	4.6	4.9	4.9
LNG	3.5	20	5	-z	<a href="#">123620</a>	np					
LNG	3.5	20	10	-z	<a href="#">123630</a>	np					
LNG	3.5	20	15	-z	-	np					
LNG	3.5	10	2	-z	<a href="#">122610</a>	np					
LNG	3.5	10	5	-z	<a href="#">122620</a>	np					
LNG	3.5	10	10	-z	<a href="#">122630</a>	np					
LNG	3.5	10	15	-z	-	np					
LNG	3.5	5	2	-z	<a href="#">121610</a>	np					
LNG	3.5	5	5	-z	<a href="#">121620</a>	np					
LNG	3.5	5	10	-z	<a href="#">121630</a>	np					
LNG	3.5	5	15	-z	-	np					
LNG	1	20	2	-z	<a href="#">100220</a>	pool	5.1%	0.7	0.8	0.9	0.9
LNG	1	20	5	-z	<a href="#">20520</a>	np					
LNG	3.5	50	5	-z	<a href="#">124620</a>	pool	29.4%	8.4	11.2	13.6	13.6
LNG	3.5	50	10	-z	<a href="#">124630</a>	np					
LNG	3.5	50	15	-z	-	np					

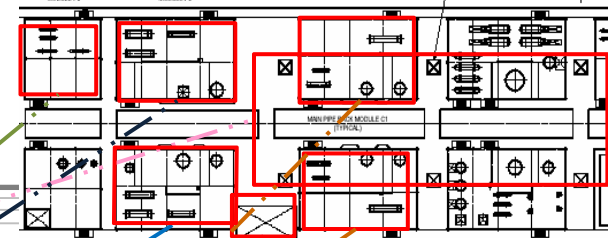
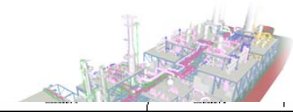
# 漏洩シナリオ発生頻度の算出



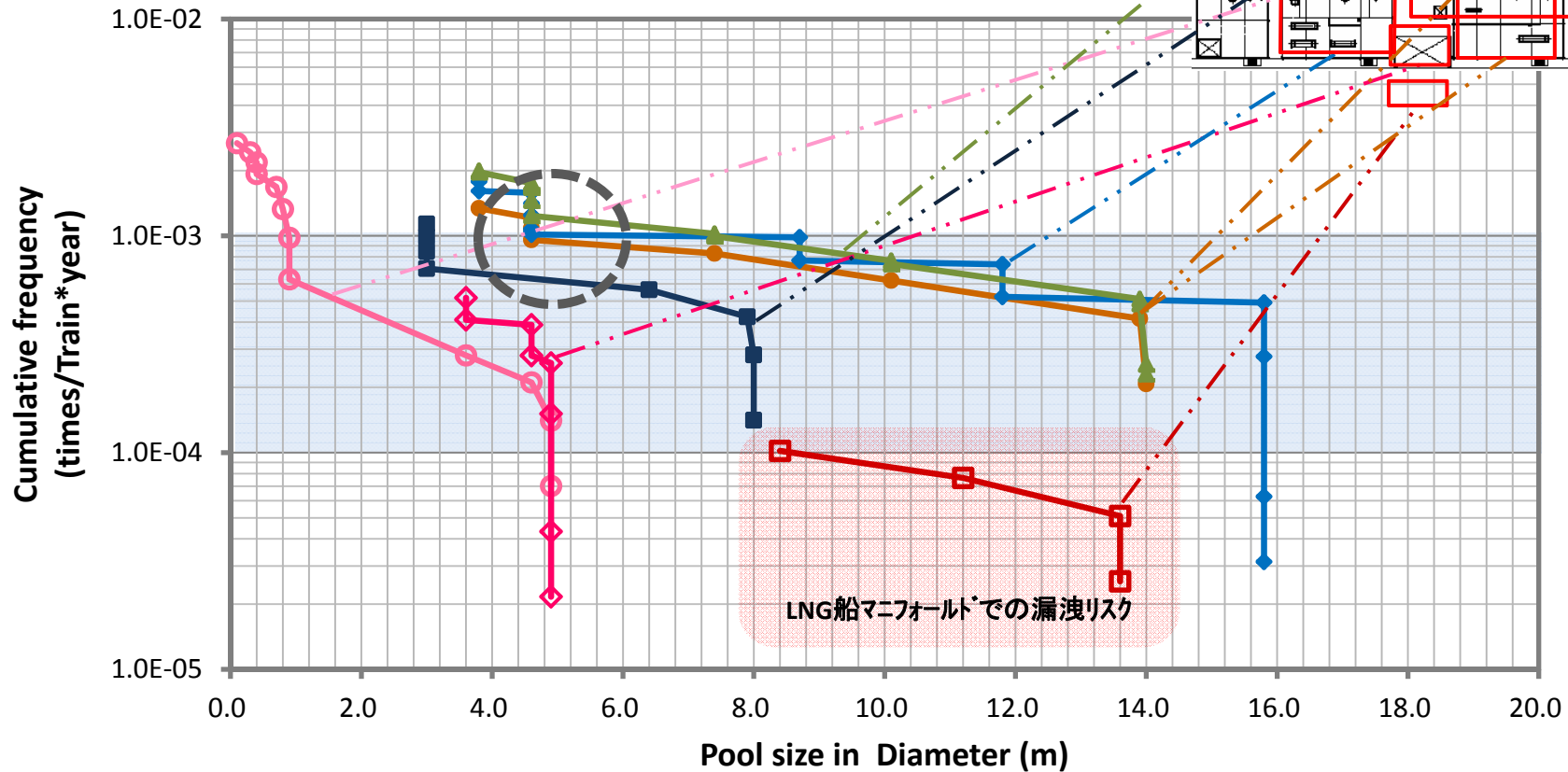
## Identifying the point of Leak

Segment #	Material	Relevant modules	Target Deck	Leak height (Location)	Hole dia	Pressure	leak direction	Total Nos simulation
7	CMR	M9	Process Dk.	1m	5mm	60bar	-z	9
				5m	10mm			
				16m	20mm			
例) Segment #7 シナリオ 全9通り				3	3	1	1	9

# FLNG極低温流体漏洩リスク解析結果



Cryogenic Pool Diameter by AREA



- M5/M6 (WMR Pre-Cooling modules)
- ◆ M9 (Liquefaction with MCHE)
- M10 (Liquefaction with End Flash)
- ▲ M12 (LPG Fractionation)
- Tank dome Offloading line & Offloading Headers
- ◇ Loading arm area (from adjacent piping)
- Loading arm area (from Loading Arms)



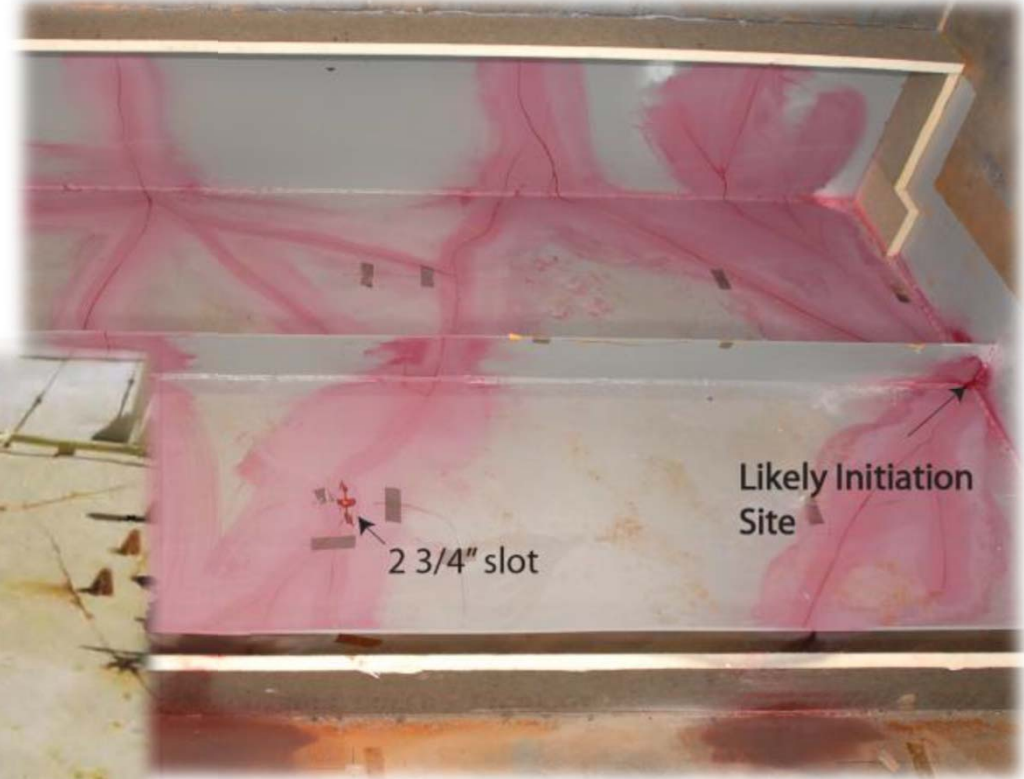
# 液溜まりサイズから補修コストの査定へ #1



## 割れの観察



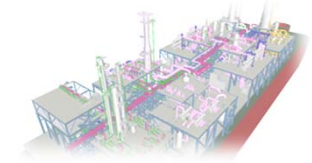
Hydrocarbon Engineer (2009)



Source : Sandia National Laboratories "LNG Cascading damage study volume I: Fracture Testing Report" , 2011

Source :Alain Vouldolon, Liquefied Gases, Marine Transportation and Storage, 2000

# 液溜まりサイズから補修コストの査定へ #2

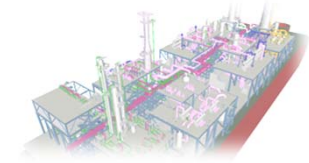


## 査定条件

	モジュールデッキ	船体上甲板
極低温流体漏洩 基本防護想定	板張り(グレーチングではなく) フラットトップ オーバーボードドレン、ドレンギャラリー複数	LNGタンク: SPB, キャンバー有り 保温対策済み: SPB タンクドームトップ、ローディングアーム回りのみ
割れの状況考察 ・応力の存在 ・き裂起点 ・伝播方向	プロセス機器は損傷無し(溶接箇所) 機器スカート・サドル、パイプサポート、計器スタクション他多数、(応力)小さい(方向)ランダム	応力は船長方向、ミッドシップ付近は特に応力値大、割れの方向はトランス方向、低温脆化割れなので、発生時既に大きい。
甲板の構造部材としての位置づけ	強度メンバーではない	重要な縦強度部材
補修指針	オフショアリペアの可能性を検討	(m単位の割れは)即時ドックで(永久)修理
修繕方法と、査定の際の簡略化等	プロセス機器にダメージはない。液溜まりの直径を1辺とする正方形分を切り替え修繕。	ドームトップに収まる漏洩は直径1m迄、それ以上は上甲板に漏出と仮定。モジュールデッキが割れて上甲板に滴ってくることはない。着地前に蒸発してしまう。

# アセットインテグリティを維持する為の修繕

## オフショア工事



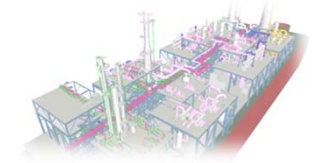
	補修範囲 (m)	補修費 (K\$)
Process Deck	5	40
	10	150
	16	400
<del>Upp. Deck</del> <del>Dome area</del>	<del>5</del>	<del>100</del>

許容されな  
いだろう。

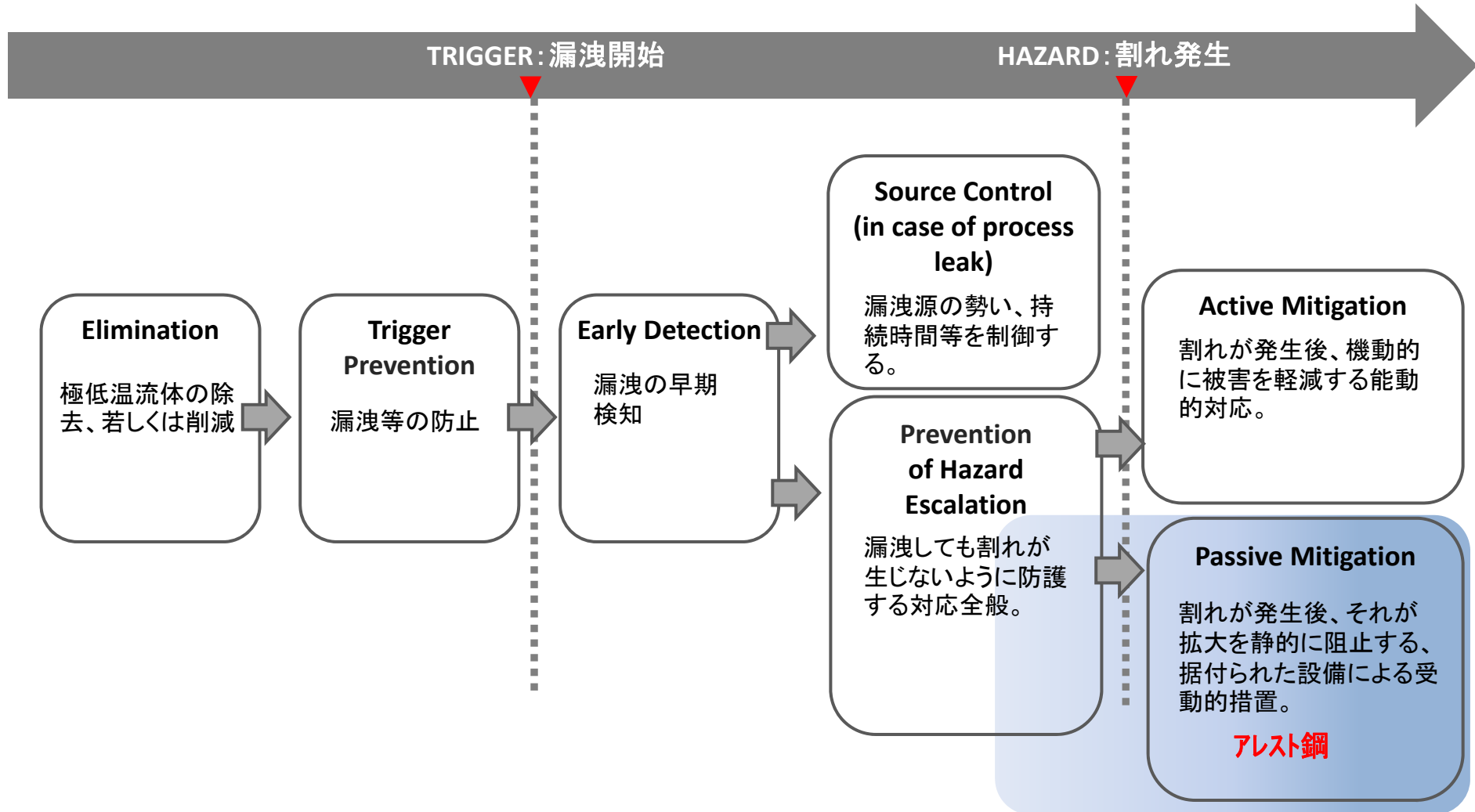
### 注記

- 1, 算定ユニットレートはシンガポール & オフショアエキストラベース(VLCCの沖修理ベース)。
- 2, プロセステッキのオフショアエリアに含まれていないコスト: 船上工事中の作業者のアコモデーション, オフショアへの移動費等、その他純然たる材工費以外一切。
- 3, 船体アッパーデッキの大規模補修はドック工事となる為、上記以外には次の費用が別途発生する。ライザー・係留切り離し、再フックアップ、予冷・液化冷媒処分・再充填費用、フィールド・ドック間の往復曳航費用、不稼働期間中オフテイクに対するLNG供給義務に伴う代替LNG手配コスト等。

# 低温脆化割れ防護手段としてのアレスト鋼

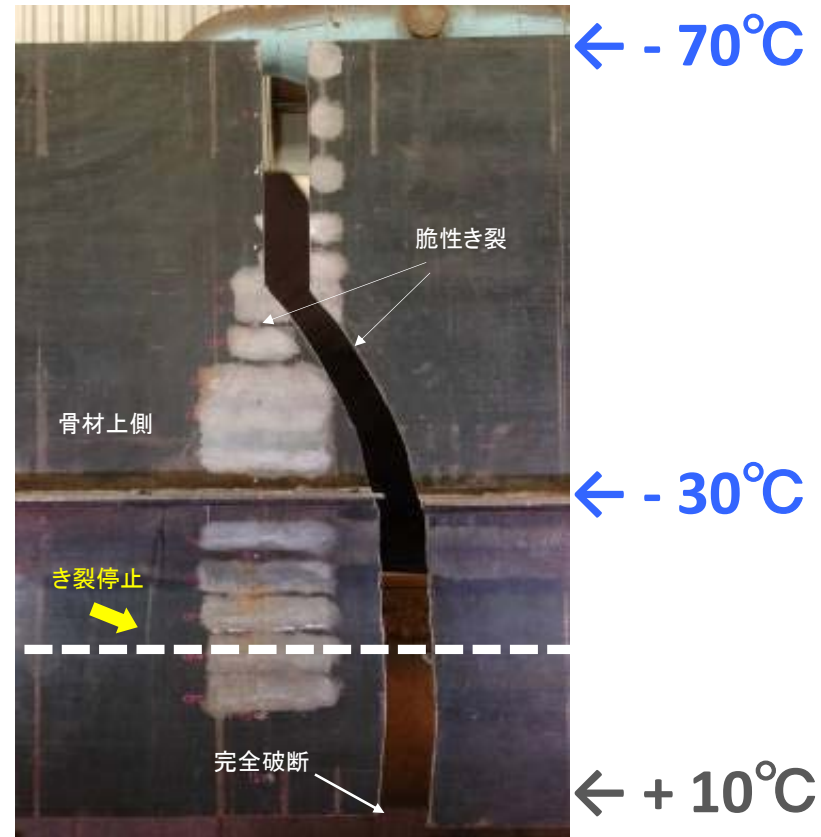
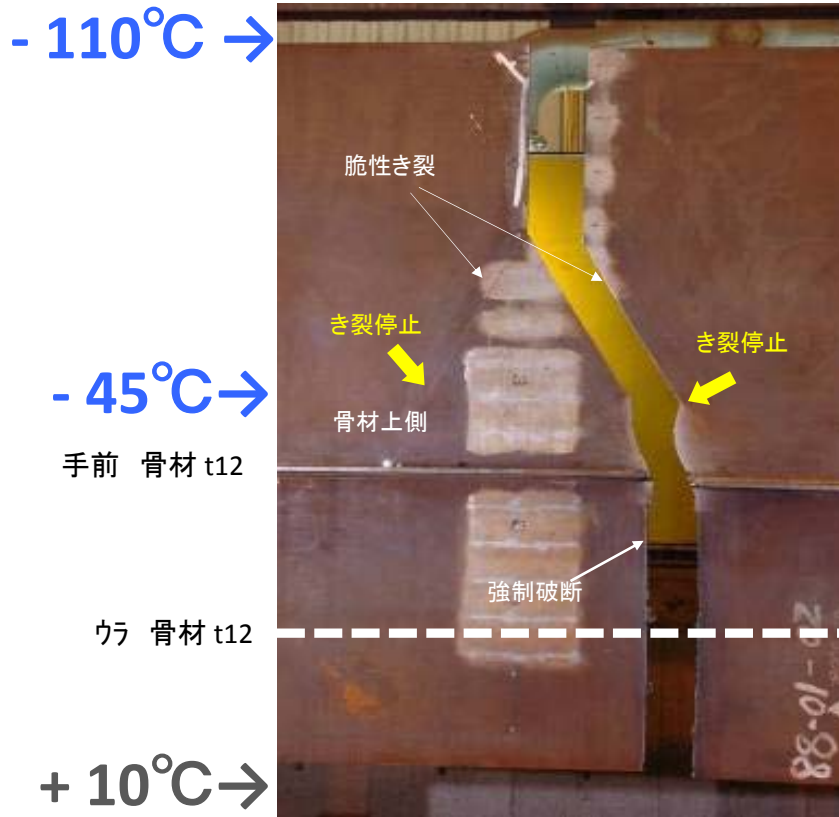


Layer of Protectionの思想に基づく位置付け





# アルスト鋼 大型構造体試験 結果 (板厚25mm)

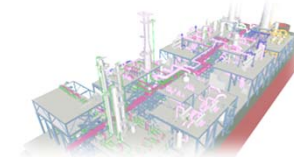


アルスト鋼 (A6000)

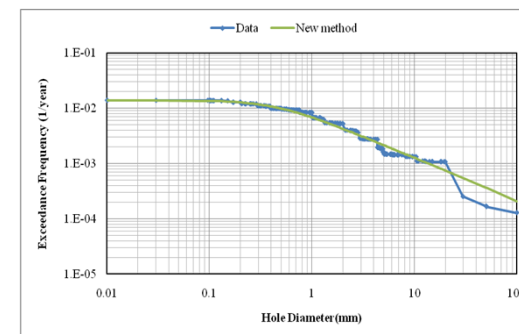
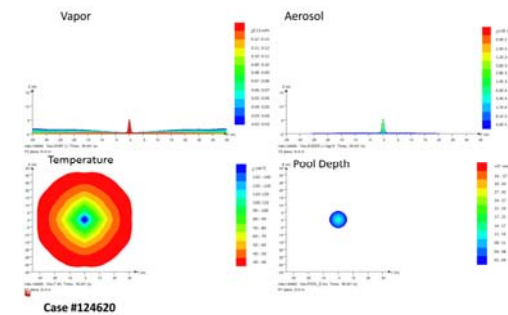
通常鋼 (KD32) ??

アルスト鋼では約-45°Cで停止。一方通常鋼では +10°Cでも伝播、停止せず。  
骨材の効果でさらに高温でのアルスト可能(本試験では骨材の手前で停止)

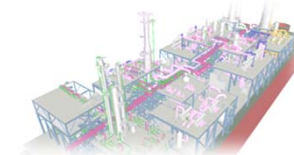
# まとめ #1



- 障害物無し、流量一定の条件で、気液二相を追う全106通りのシミュレーションを行った。液溜まりが形成されたのは、デッキ上1m, 2mといった比較的低位から鉛直下向きに漏洩したケースに限定された。
- UK HSEからLNG施設にも共通する事例を抽出し、それに対して漏洩頻度解析を行った。その結果、漏洩頻度は穴径の修正べき乗分布を用いて表現されることを確認した。
- 極低温流体漏洩のリスク解析の結果、FLNG各所に於ける液溜まりの大きさをリスクを表現した。極低温流体の漏洩頻度データについては、より信頼性を向上させる為に、LNG業界を挙げて漏洩データの情報共有が望まれる。



## まとめ #2



- リスク解析結果から、モジュールデッキ、上甲板他、損傷の度合いを査定し、事故後の対応の違いを明らかにした。上甲板は脆化割れが発生したあとのコストを考慮すれば、漏洩が発生しても割れが生じないような防護対策をとることが賢明である。
- -40°C近傍でも良好なアレスト性能を発揮するTMCP鋼を開発した。(Kca=6000N/mm<sup>1.5</sup>, @-40°C)
- 開発したアレスト鋼は、保温性能を有する塗装材料と組み合わせて使用することにより、FLNG上での極低温流体漏洩に備えた防護設備の全体コストを低減出来る可能性がある。



2012 ClassNK 共同研究成果報告会

## FLNG向け極低温流体漏洩リスク解析と、 脆化被害軽減を目指したアレスト鋼適用の基礎的検討

( 2011.5 ~ 2012.8 終了予定 )



主担当： 船体構造データ提供、脆化割れ修繕費用  
査定、アレスト鋼活用評価



主担当： 脆化割れの船級見解、リスク解析過程へ  
リファインメント



主担当： 漏洩シナリオ策定、漏洩・拡散シミュレーション、  
漏洩事故・事故頻度調査（共同研究事務局）



主担当： 供試鋼(アレスト鋼)製造、大型破壊試験



主担当： 漏洩発生頻度解析



本研究は、一般財団法人 日本海事協会の「業界要望による共同  
研究スキーム」による支援を受けて実施しました。

