

## AFC 強制換気効果の安全設計への反映

### Safety in Design Considering AFC Ventilation Effect

田辺 雅幸  
Masayuki Tanabe

プロセス技術本部 HSE システム部  
HSE Systems Department, Process Technology Division

#### 要旨

LNG プラントのように大規模な Air-Fin-Cooler (AFC)を採用する場合、AFC による強制換気効果が生じる。実運転プラントにおいても AFC による局所的な強風があることが報告されている。漏えい事故が生じた際にもこの強制換気効果により可燃性ガス濃度領域に入るガス量を減らすことができるものと期待できる。昨今プラント安全設計においては爆発が生じた後に対処する設計面（耐爆設計）が強く意識されてきているが本稿では滞留するガス雲自体を換気効果による減らすという本質安全に着目し、AFC による強制対流効果の定量的評価を行い、モジュール間離隔距離との関連を検証した。

#### Abstract:

Many base load onshore LNG plants use a large number of Air-Fin-Coolers (AFC) normally mounted on the center pipe rack of the LNG process train. This paper evaluates the effect of the Air-Fin-Cooler induced air flow in modularized LNG plants as Air Change per Hour (ACH) and flammable gas volume using Computational Fluid Dynamics (CFD) analysis. Based on the results of this evaluation, the inherent safety design measures, such as Separation Distance (SD), which should be taken into consideration in the Concept Definition phase, are proposed to optimize the use of Air-Fin-Coolers (AFC).

#### 1. はじめに

昨今の LNG プラント開発は FLNG やオンショアモジュールに代表されるようにプロセスプラント内のレイアウトが混雑化している。このため漏洩事故が発生し着火すると燃焼伝播面を乱流化することになり大規模な爆発が生じるリスクが高まる。FLNG やオンショアモジュールプロジェクトでの安全設計の昨今のトレンドは、爆発影響を下げるためモジュール間離隔距離 (Separation Distance; SD) をこれまでにない広さを設定する (モジュール幅(D)の半分(0.5D)程度)、もしくは安全上重要な緊急システム等は機能性を保つよう高い爆発荷重に耐える設計にするなど、ロバストな設計を志向するようになってきている。

本稿では可燃性ガス漏えい事故が生じた際に LNG プラントに設置されている Air-Fin-Cooler (AFC)による強制換気効果を考慮することで可燃性ガス雲がプラント内に滞留する量を削減することが可能ではないかという観点から Computational Fluid Dynamics (CFD)解析を実施し定量的評価を行った結果を報告する。本スタディは実 LNG プラント運転

中に AFC による局所的な強風が観測されているという報告に着想を得て開始された。CFD 解析は安全解析に多くの経験を持つイギリスの安全解析専門コンサルタントの MMI 社に委託して行った。

## 2. 検討手法

本検討は AFC による空気換気効果 ACH (Air Change per Hour) を評価するベンチレーションスタディとガス漏えい時に滞留するガス量を推算するガス拡散スタディの 2 段階に分けて実施した。

どちらのスタディも CFX という CFD ソフトウェアを用い、オンショア LNG プラントで典型的な年産 500 万トン規模の LNG プラントをモデルとして検討を行った。大気風向はプロセストレインの長手方向に対して直角 (Perpendicular Wind) と並行 (Parallel Wind) の 2 種類、風速は 5m/s と 10m/s の 2 種類を設定した。加えて設計の違いによる強制換気効果の変化を確認するため、以下のケースについてスタディを実施した。

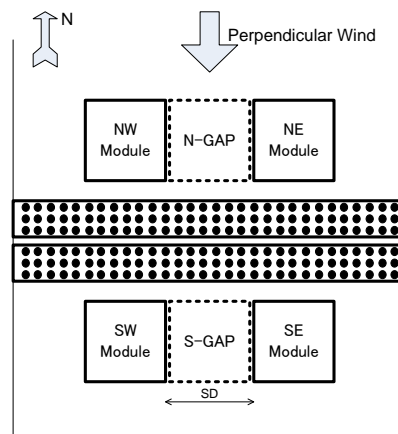
- AFC 運転しているケース(AFC-on)と AFC 運転停止ケース(AFC-off)
- モジュール間離隔距離(SD)として 8m、15m、25m のケース

また本稿では触れないがベンチレーションスタディでは LNG 漏えい時の集液設計思想との関連からモジュール床材 (プレート、グレーチング) の違いが換気効果に与える影響についても検証している<sup>1)</sup>。

### 2. 1 ベンチレーションスタディ

プラント内の換気度を定量化するために本ベンチレーションスタディでは一時間のうちに空気が入れ替わる回数である ACH (Air Change per Hour) を指標として用いた。CFD モデル内では ACH 測定対象エリアの各境界面を通過する空気量をモニタリングし ACH として算出している。

計算には Fig.1 および Fig.2 で示すようなトレイン内のいくつかのモジュールを切り出した簡易なモデルを使用した。



**Fig.1** CFD Model boundary for Perpendicular Wind case (perpendicular to the train axis)

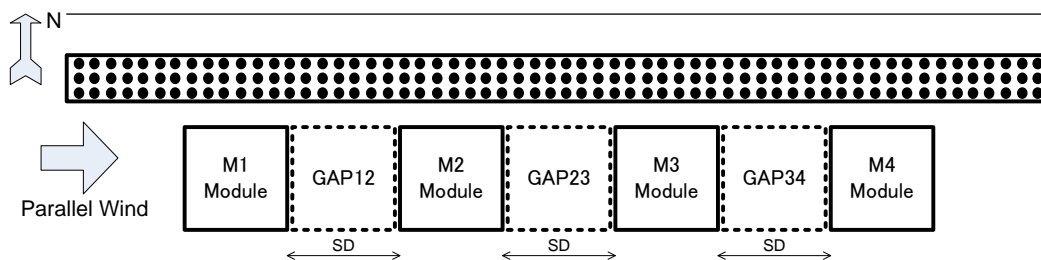


Fig.2 CFD model boundary for Parallel Wind case (parallel to the train axis)

スタディの結果、特にトレイン長手方向に直角な風向きケースにおいて AFC 運転時の顕著な換気回数増加効果を観測した。

- 風上側モジュール全体で 34 - 36%の増加
- 風上側モジュールデッキ下で 127 - 150%の増加
- モジュール間の離隔距離空間デッキ下高さ 179%の増加

Table 1 に大気風速 5m/s 時の AFC-on による ACH 増加度を示す。

Table1. Increase of ACH due to AFC-on with 8m SD

Wind Condition	Area	%Increase in ACH due to AFC-on		
		Whole Module	Above Deck	Below Deck
Perpendicular Wind	NE	34	36	150
	NW	36	37	127
	N-GAP	37	39	179
Parallel Wind	GAP12	7	5	36
	GAP23	25	24	45
	GAP34	41	40	45

また Fig.3 にベンチレーションスタディの結果を空気の流れ(Air Stream Line)で示した図を示す。Table 1 の結果でもデッキ下エリアでの ACH 増加が見られるが、これは Fig.3 に見られる AFC への流入空気の動きが影響していることがわかる。

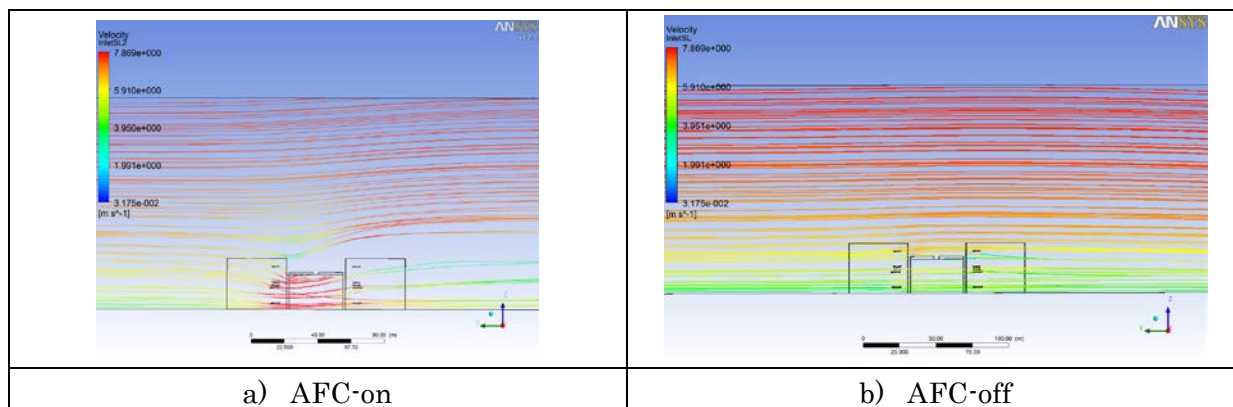


Fig.3 Air Flow Stream Line

## 2. 2 ガス拡散スタディ

プラント内の換気度が定量化できることで可燃性ガス雲滞留の可能性を相対的に評価できることになる。しかしながらこの手法は漏えいガスの流速が小さい場合（例えば可燃性液体プールからの初速のない気化ガスケース）の評価には良いが、プロセス運転圧力が高いサービスからの漏えいのような流速の早いジェット漏えいの場合には注意が必要である。ジェット漏えいの際には流出したガスの勢いが勝り、特にモジュール間の GAP で観測されている高換気度を打ち消す可能性があるためである。このジェット漏えいケースの評価を行うために CFD を用いたガス拡散スタディを実施した。Fig.4 に当スタディで用いたモデルとジェット漏えいの吹き出し方向を示す。ベンチレーションスタディと同様に、大気風向・風速条件を用いている。ガス漏えいモデルのため可燃性ガス漏えい量として 3kg/s（2 インチ配管破損に相当するケース）と 50kg/s（8 インチ配管破損相当するケース）の 2 ケースを設定した。また設計面による違いを確認するため、ベンチレーションスタディと同様に AFC 運転しているケースと AFC 運転停止ケース、モジュール間離隔距離を 8m、15m、25m のケースでの比較検討を行った。

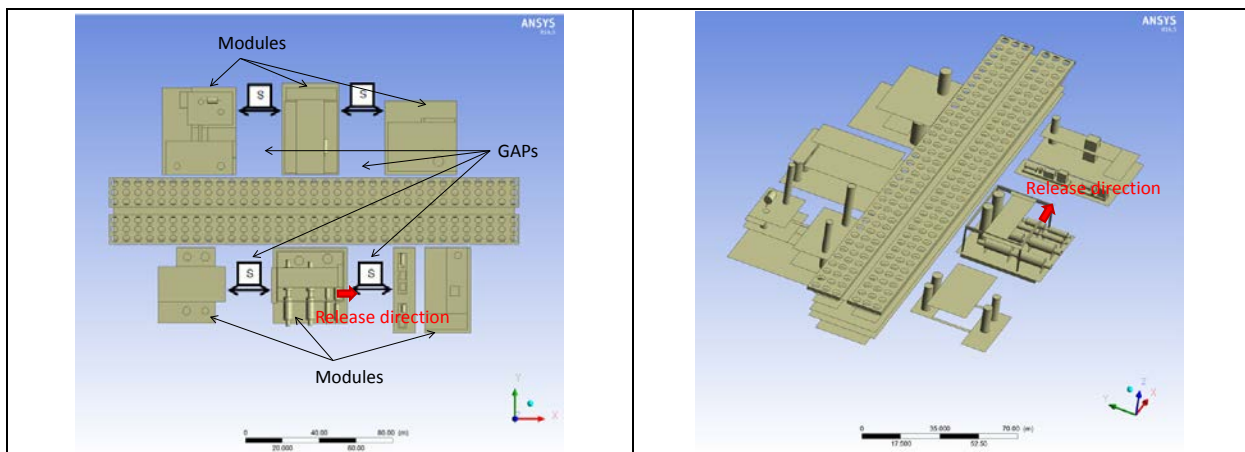


Fig.4 CFD Geometry for Gas Dispersion Study

可燃性ガスの爆発下限界濃度（LEL）の広がりを示した図を Fig.5 から 7 に示した。濃度の濃い方から 100%LEL（赤色）、50%LEL（青色）、20%LEL（緑色）、10%LEL（ピンク）の広がり示している。これらの図から AFC-on の際に若干可燃性ガス領域が小さくなっているように見える。

Fig.8 に 50kg/s 漏えいケースでの可燃性領域（爆発下限界と上限界の間）のガス量をモジュール間離隔距離に応じて AFC-on と AFC-off ごとに比較した図を示す。AFC-on となることで可燃性ガス滞留量が削減される傾向が見える。特に、SD が小さい場合にはその傾向が顕著で、SD が大きくなるにつれてその効果は低くなっていく傾向にある。

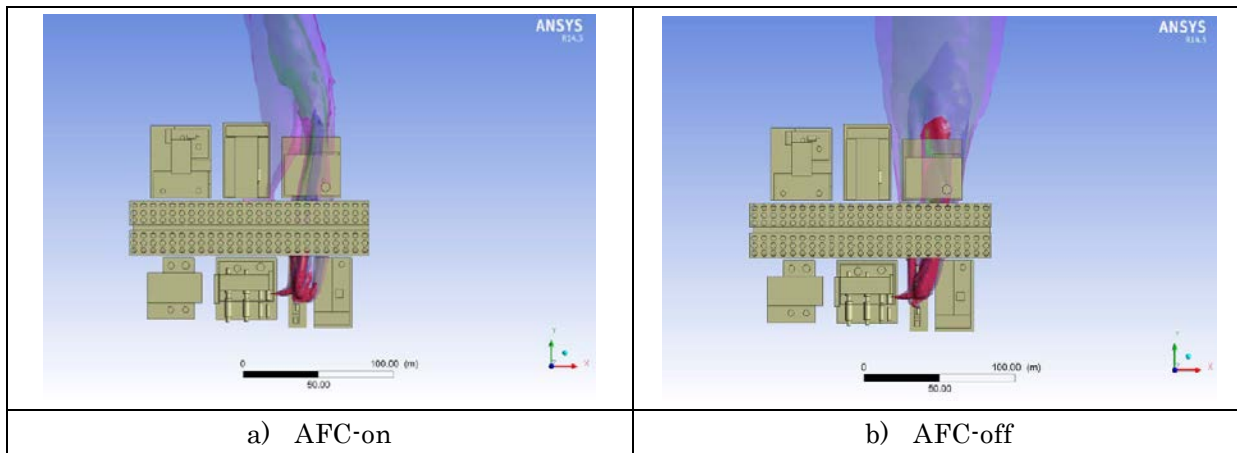


Fig.5 AFC-on & AFC-off 50kg/s 8mSD Perpendicular Wind

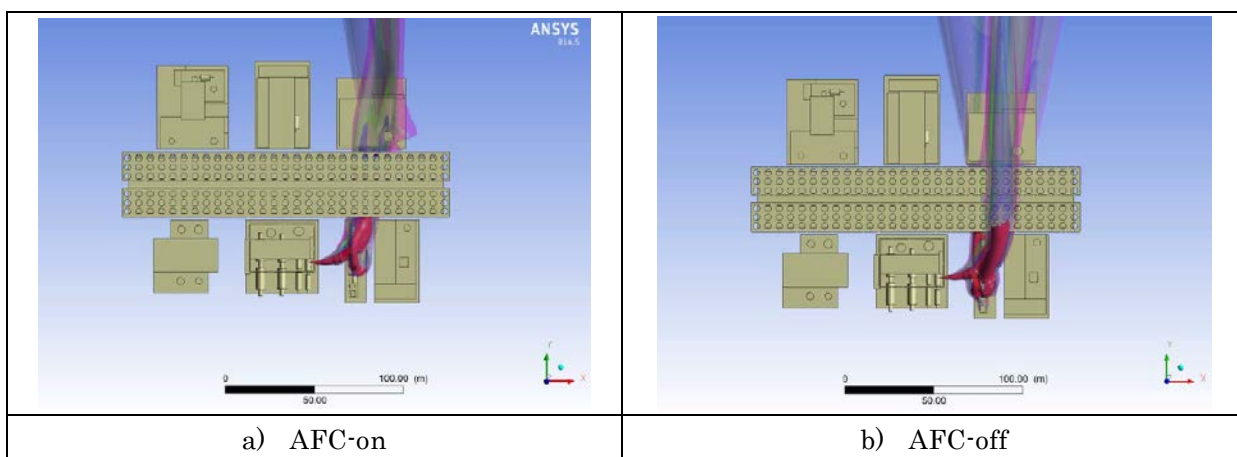


Fig.6 AFC-on & AFC-off 50kg/s 15mSD Perpendicular Wind

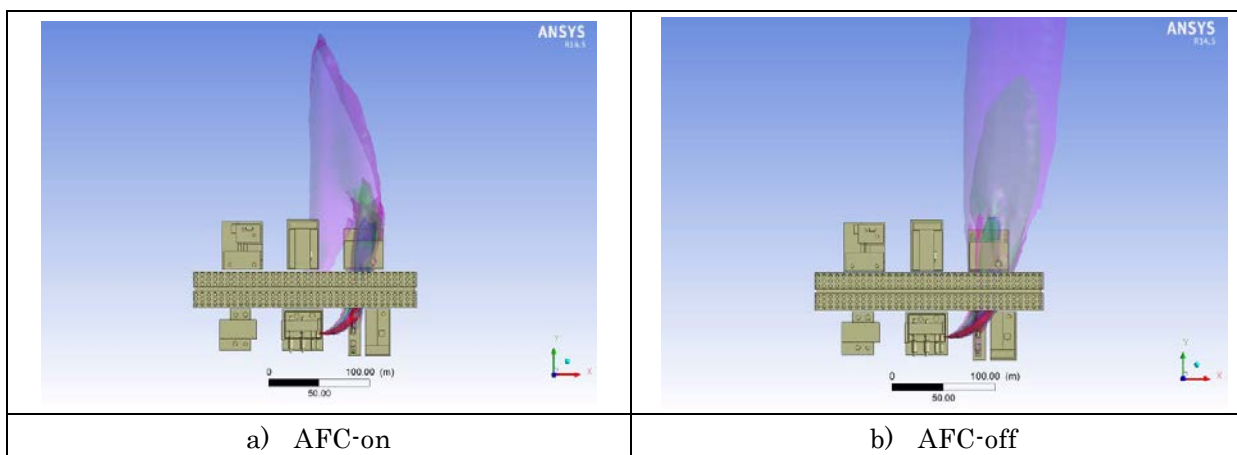


Fig.7 AFC-on & AFC-off 50kg/s 25mSD Perpendicular Wind

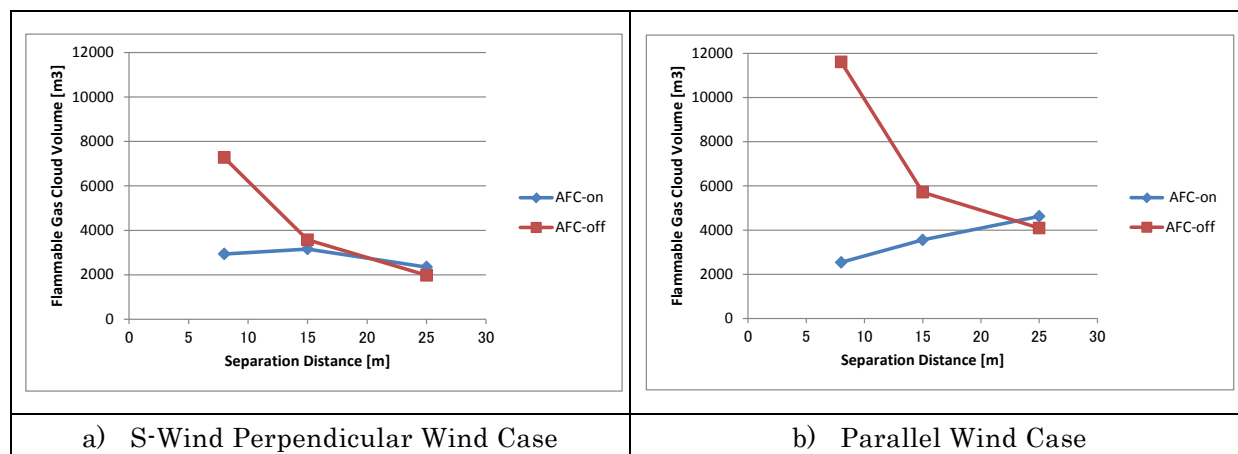


Fig.8 Comparison 50kg/s Release

### 3. 設計への反映

CFD 解析にかかる時間が非常に長いため本スタディのケース数は限定されている。(ベンチレーションスタディ 48 ケース、ガス拡散スタディ 24 ケース) このため、ただちに設計への適用という話にはならないが、AFC による換気効果により可燃性ガス滞留量を削減する効果があることは定量的に評価することができた。さらにモジュール間離隔距離が大きく取れないような敷地広さに限界がある場合においては AFC をプラント内換気効果高めるという視点で考慮することにより SD を短くする根拠として使うことも考えられる。今回の結果から言えば 15m は一つの妥当な数値と言える。ただし、敷地に限界がある場合には SD を 15m 以下にすることも考えられる。また、SD を 15m 以上大きくしても換気効果にはあまり寄与しないことが分かった。15m は現在当社が標準的に推奨しているモジュール離隔距離である。

ただし当然のことながらレイアウトは換気効果だけで決まるものではなく、運転上の要求・敷地の限界・Hot Air Recirculation など総合的に判断して決めるべきである。

### 4. まとめ

近年増えてきている FLNG、オンショアモジュールプロジェクトを中心に大きな離隔距離を取ることで爆発影響削減効果を取ろうとするトレンドがある。爆発が起こった後の影響削減に関して文献等ではモジュール幅の半分の離隔距離が推奨されている(実プラントに適用すると 25m 前後)。一方、本検討では爆発が起きてしまったからの影響ではなく、プラント内の換気度を評価し爆発が生じにくくなる離隔距離についてオンショアモジュール LNG プラントデータを用いて検討した。結果、換気効果に関しては 15m 程度の離隔距離が一つの目安となることがわかった。設計指針として確立する段階には至っていないが今後爆発が起こった後の評価のみではなく爆発を生じにくくさせる換気効果も合わせて考えることで最適なレイアウト・離隔距離を提案できる可能性があることがわかった。

### 引用文献

- 1) Tanabe M, Miyake A. Forced Ventilation Effect by Air-Fin-Cooler in Modularized Onshore LNG Plant, Process Safety Environ Protect. 2013;91:351-366.