

プラント防災とシミュレーション

- 消防車等の配置計画
 - タンク火災
 - プロセス地区火災
- ボイルオーバーの危険性
- 火災からの輻射熱の推定と対応
- 危険物の漏洩とガス拡散
- 消火配管の経年劣化

株式会社 FPEC (エフベック)

消防車等の配置計画

シミュレーションを使った計画

タンク火災

タンク火災

- タンク火災の上昇気流(タンクの中心ほど大きく、周辺ほど小さくなる)
- 炎の高さ
- タンク周辺の輻射熱→消防活動上の安全確認
- **ボイルオーバーの可能性チェック(後述)**

泡放射

- 泡の飛散損失
- 泡の放射軌跡→風の影響を反映した放射軌跡→消防車等の配置
- 泡が上昇気流により吹き飛ばされる
- スウィートスポット方式(推奨)とフットプリント方式

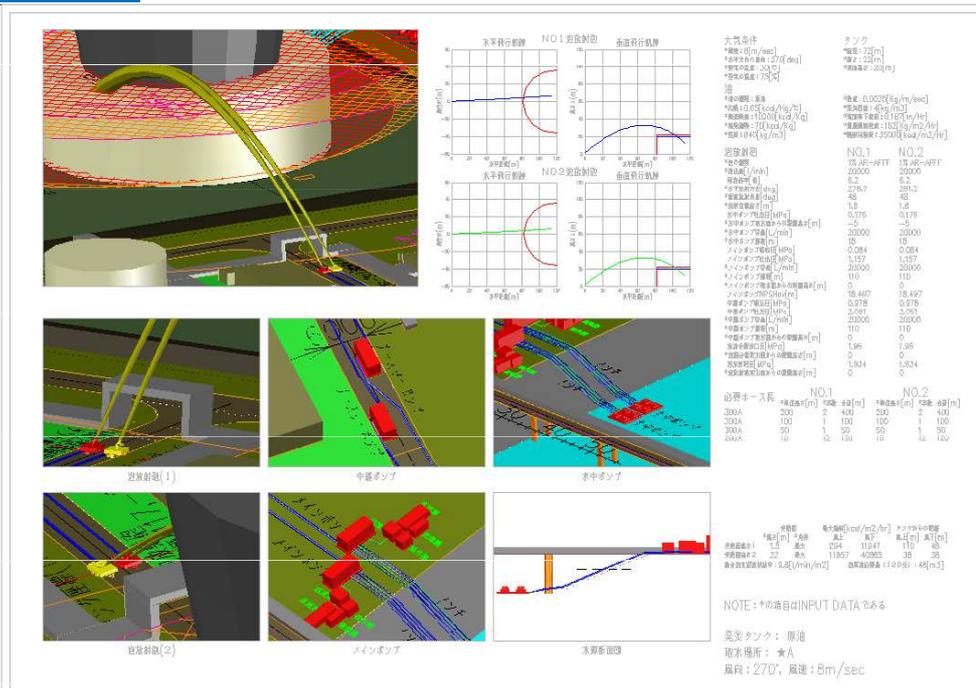
消火

- 泡が燃焼面に着地→蒸発→更なる泡投入→泡の橋頭保確立
- 泡の展開→消火

消防車等の配置計画

業務実績 (例)

タンク火災警防計画

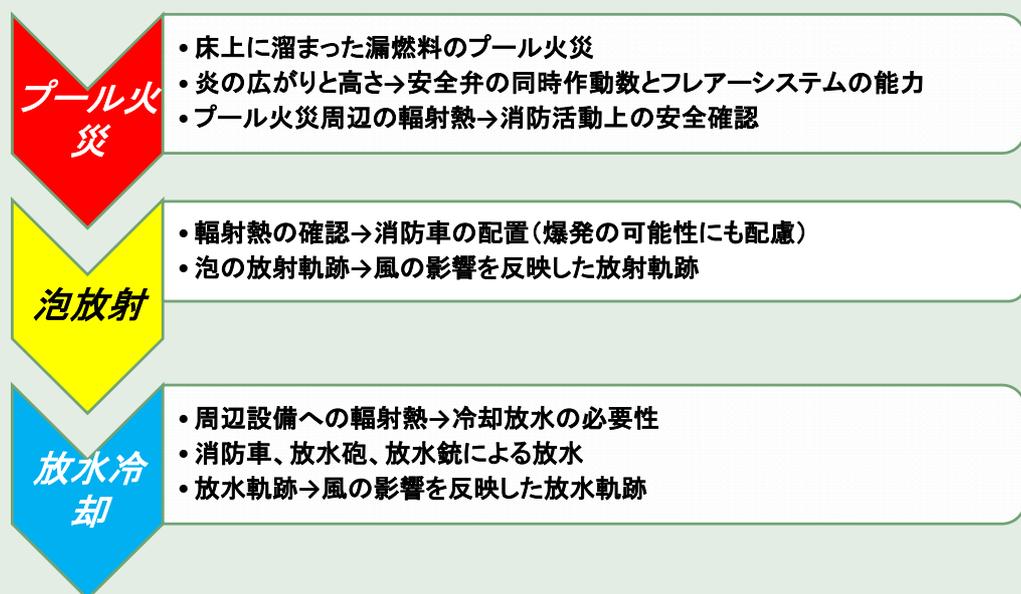


当社のシミュレーションプログラム、FRT モジュールを使用し、風速8m/sの時、直径72mの原油タンク火災が起こったとして、大容量泡放射2万L/min、2基で消火する場合についてシミュレーションした結果。

消防車等の配置計画

シミュレーションを使った計画

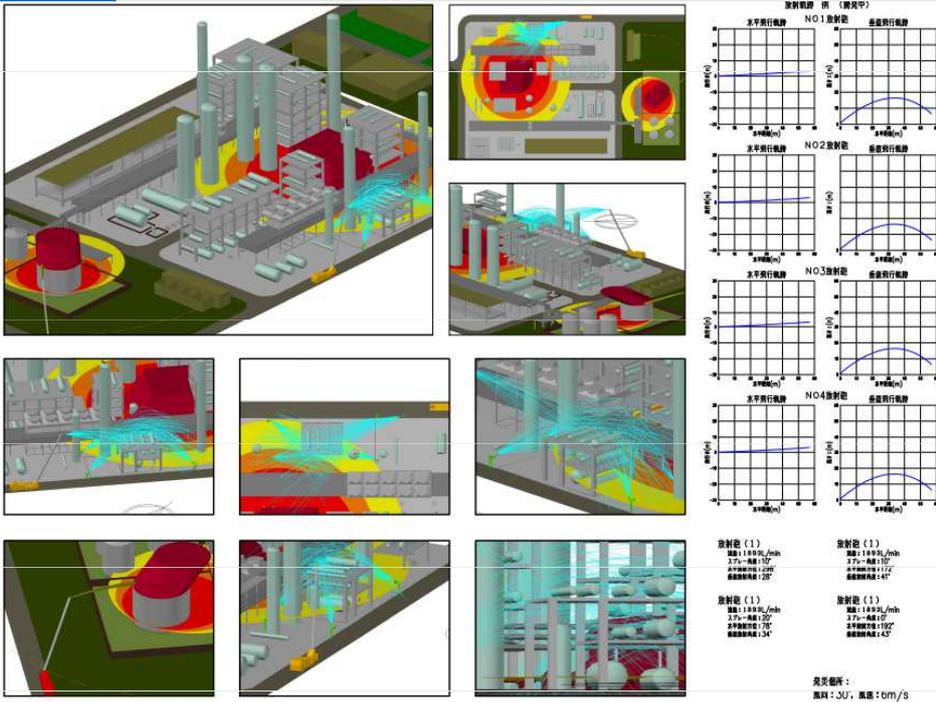
プロセス地区火災



消防車等の配置計画

業務実績(例)

プロセス地区火災警防計画



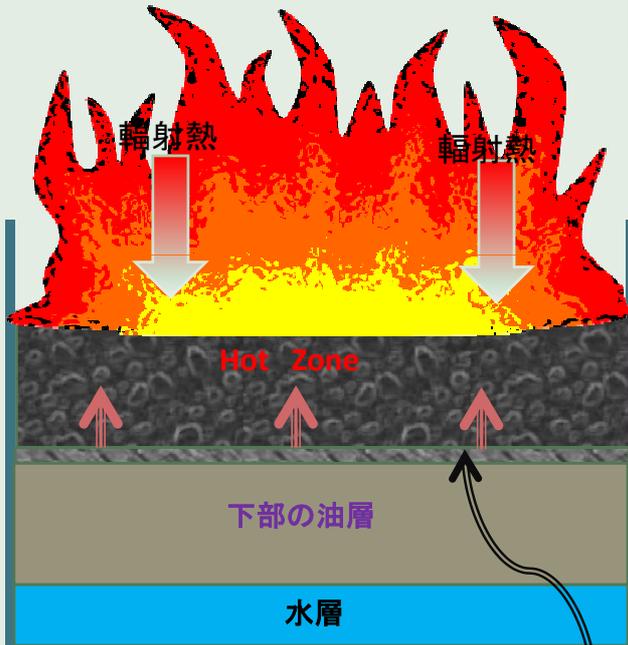
当社のシミュレーションプログラム、泡、水、輻射熱の3つのモジュールを使用し、タンク火災や漏洩火災が起こったとして、大型化学消防車や放水砲などで消火、放水冷却などの活動をシミュレーションした結果。

ボイラーオーバーの危険性

ボイラーオーバー発生のメカニズム
(原油など多成分の場合)

火災における伝熱の特徴

上から加熱→対流が起こらない→
熱伝導のみ→極めて遅い下方への伝熱



Hot Zoneと下部油の接する界面で加熱され油の塊が上昇して行く



ボイloverの危険性

ボイlover発生メカニズム (原油など多成分の場合)

(原油2のシミュレーション結果)

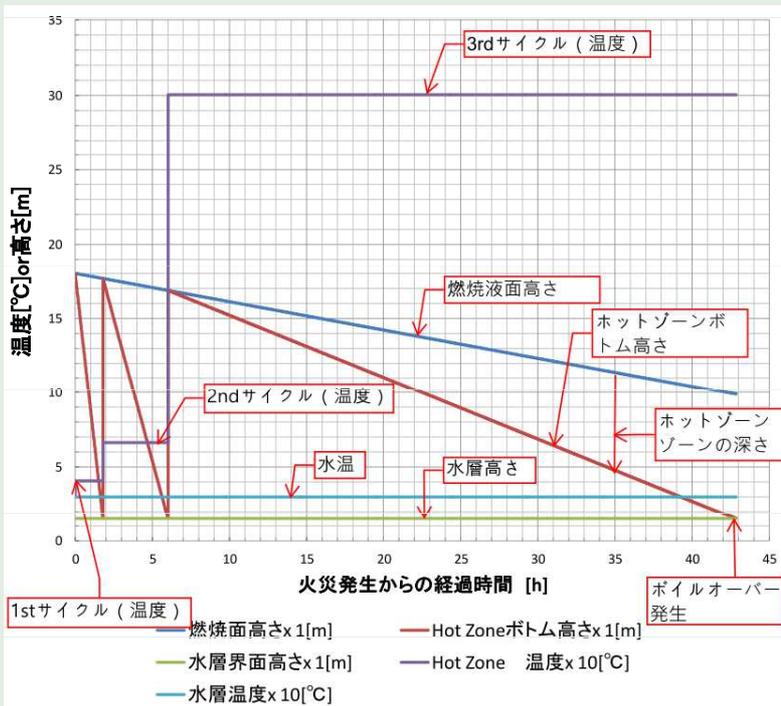
計算条件		原油-2	
列番号 漏洩物質名	6		
タンク直径	Dt	80.0	[m]
タンク高さ	Ht	22.0	[m]
初期液面高さ	Lt	18.0	[m]
定圧比熱 (Hot Zone)	CpLTz	0.650	[Kcal/kg/°C]
定圧比熱 (下層oil)	CpLTo	0.650	[Kcal/kg/°C]
定圧比熱 (水層)	CpLTw	1.000	[Kcal/kg/°C]
熱伝導率 (Hot Zone)	λLTz	0.1290	[Kcal/m/hr]
熱伝導率 (下層oil)	λLTo	0.1290	[Kcal/m/hr]
熱伝導率 (水層)	λLTw	0.5236	[Kcal/m/hr]
計算時間刻み	Δθ	1.0	[sec]
最大計算時間	θmax	6000.0	[min]
表示時間刻み	δθ	1.0	[min]

計算結果		Boilover時の	
Hot Zone 温度	Tz	300.4	[°C]
燃焼液面高さ	Hsf	9.9	[m]
発生時間		42.9	[h]
発生時間		1.8	[day]

タンク内燃焼前温度	Tinit	30.0	[°C]
燃焼前水層温度	Twint	30.0	[°C]
大気温度	Tatm	30.0	[°C]
燃焼速度	Vb	162	[kg/m ² /hr]
蒸発潜熱@Tz	ΔHvTz	70	[kcal/kg]
初期水層高さ	Lw	1.5	[m]
密度 (Hot Zone)	ρLTz	855.8	[kg/m ³]
密度 (下層oil)	ρLTo	855.8	[kg/m ³]
密度 (水層)	ρLTw	1,000.0	[kg/m ³]
計算精度	Acc	1.0	[%]
Boilover 発生温度	TwB	120.0	[°C]
蒸留カーブ最大温度	Tzmax	500.0	[°C]

液面降下速度	Vsf	-0.19	[m/h]
Hot Zone 成長速度	Vhzc	0.00	[m/h]
Cycle数	cycle	3	[—]

FPEC



ボイloverの危険性

ボイlover発生メカニズム (原油など多成分の場合)

(原油8のシミュレーション結果)

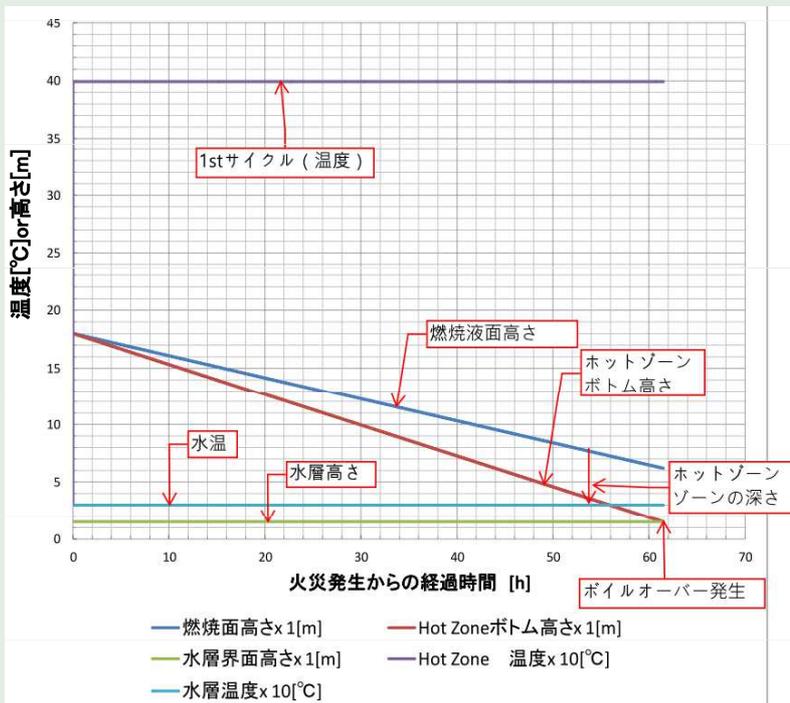
計算条件		原油-5	
列番号 漏洩物質名	9		
タンク直径	Dt	80.0	[m]
タンク高さ	Ht	22.0	[m]
初期液面高さ	Lt	18.0	[m]
定圧比熱 (Hot Zone)	CpLTz	0.650	[Kcal/kg/°C]
定圧比熱 (下層oil)	CpLTo	0.650	[Kcal/kg/°C]
定圧比熱 (水層)	CpLTw	1.000	[Kcal/kg/°C]
熱伝導率 (Hot Zone)	λLTz	0.1290	[Kcal/m/hr]
熱伝導率 (下層oil)	λLTo	0.1290	[Kcal/m/hr]
熱伝導率 (水層)	λLTw	0.5236	[Kcal/m/hr]
計算時間刻み	Δθ	1.0	[sec]
最大計算時間	θmax	6000.0	[min]
表示時間刻み	δθ	1.0	[min]

計算結果		Boilover時の	
Hot Zone 温度	Tz	399.1	[°C]
燃焼液面高さ	Hsf	6.2	[m]
発生時間		61.5	[h]
発生時間		2.6	[day]

タンク内燃焼前温度	Tinit	30.0	[°C]
燃焼前水層温度	Twint	30.0	[°C]
大気温度	Tatm	30.0	[°C]
燃焼速度	Vb	162	[kg/m ² /hr]
蒸発潜熱@Tz	ΔHvTz	70	[kcal/kg]
初期水層高さ	Lw	1.5	[m]
密度 (Hot Zone)	ρLTz	844.2	[kg/m ³]
密度 (下層oil)	ρLTo	844.2	[kg/m ³]
密度 (水層)	ρLTw	1,000.0	[kg/m ³]
計算精度	Acc	9.0	[%]
Boilover 発生温度	TwB	120.0	[°C]
蒸留カーブ最大温度	Tzmax	565.0	[°C]

液面降下速度	Vsf	-0.19	[m/h]
Hot Zone 成長速度	Vhzc	0.08	[m/h]
Cycle数	cycle	1	[—]

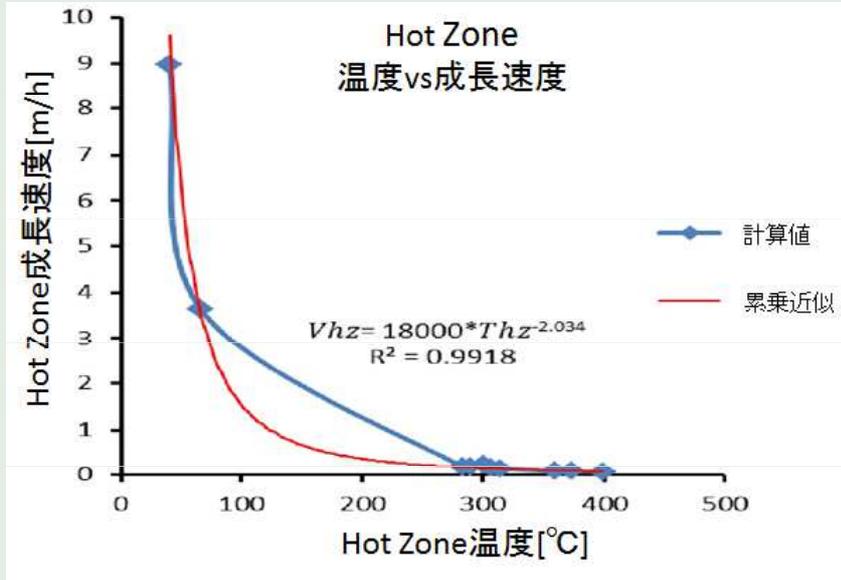
FPEC



ボイルオーバーの危険性

ボイルオーバー発生のメカニズム
(原油など多成分の場合)

Hot Zoneの成長速度



$V_{hz} = 18,000 * T^{-2.034}$

ここで、

V_{hz} ; Hot Zoneの成長速度 [m/hr]

T ; Hot Zoneの温度 [°C]

$T = 120^{\circ}\text{C}$ とすると,
 $V_{hz} = 1.06$ [m/h]と
なる。
この結果はLastFire
の提言と一致する。

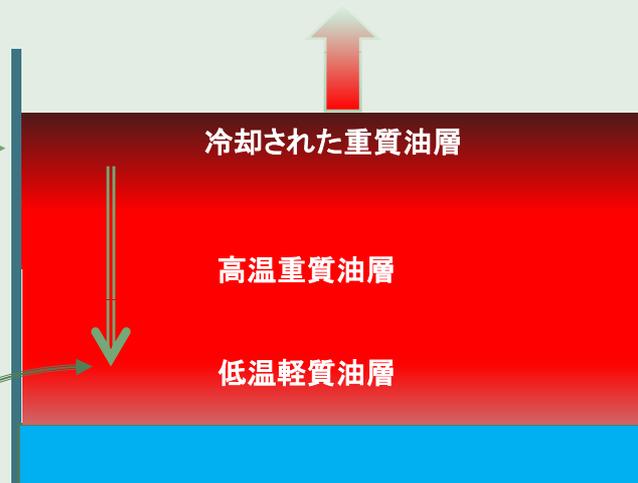
ボイルオーバーの危険性

消火後油温の変化に伴う現象
(鍋蓋現象)

風による対流伝熱及び輻射熱による熱放散によってタンク液面から冷却されていく。

重質油層なので温度低下と共に密度が下層油よりも大きくなる、逆転現象が拡大する。所謂、鍋蓋がタンク液表面にあるような状態になっている。

油温は主として熱伝導により、非常にゆっくりと表面からボトムに向かって降下していく。



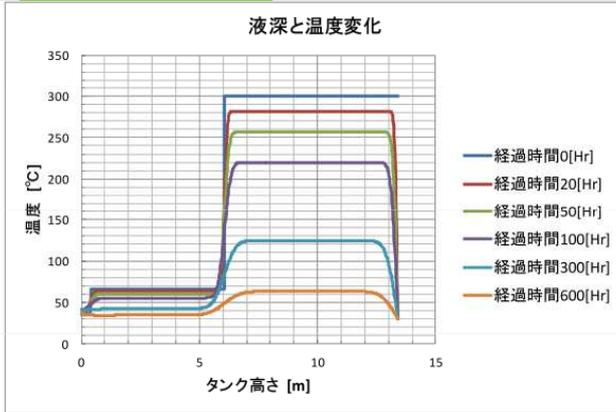
この部分は元々Hot Zone部分であり重質油層である。

ボイラーオーバーの危険性

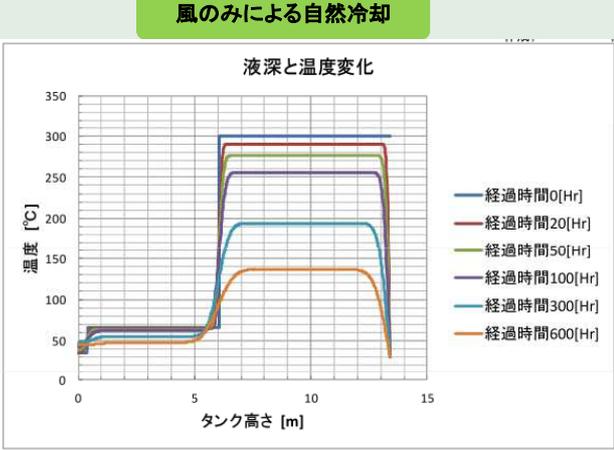
消火後の温度変化 (計算モデル)

消火後の油の冷却時間(計算結果)

放水冷却



高温HotZone	液面高さ	13.4	[m]	油の物性	密度	840	[kg/m ³]
	初期温度	300	[°C]		比熱	0.65	[kcal/kg/°C]
低温HotZone	頂部高さ	6.03	[m]		熱伝導率	0.129	[kcal/m/h/°C]
	初期温度	66	[°C]	水の物性	密度	996	[kg/m ³]
水層	頂部高さ	0.4	[m]		比熱	0.998	[kcal/kg/°C]
	初期温度	35	[°C]		熱伝導率	0.5279	[kcal/m/h/°C]
環境条件	大気温度	30	[°C]	液表面	熱伝導率	8.6	[kcal/m ² /h/°C]
				タンク外壁熱伝達率	150	[kcal/m ² /h/°C]	
	タンク直径	82	[m]		タンク内壁熱伝達率	50	[kcal/m ² /h/°C]
計算時間	最大時間	600	[hr]	タンク側壁からの熱損失	算入する	—	
	時間刻み	30	[min]	高さ方向	高さ刻み	0.025	[m]



高温HotZone	液面高さ	13.4	[m]	油の物性	密度	840	[kg/m ³]
	初期温度	300	[°C]		比熱	0.65	[kcal/kg/°C]
低温HotZone	頂部高さ	6.03	[m]		熱伝導率	0.129	[kcal/m/h/°C]
	初期温度	66	[°C]	水の物性	密度	996	[kg/m ³]
水層	頂部高さ	0.4	[m]		比熱	0.998	[kcal/kg/°C]
	初期温度	35	[°C]		熱伝導率	0.5279	[kcal/m/h/°C]
環境条件	大気温度	30	[°C]	液表面	熱伝導率	8.6	[kcal/m ² /h/°C]
				タンク外壁熱伝達率	10	[kcal/m ² /h/°C]	
	タンク直径	82	[m]		タンク内壁熱伝達率	50	[kcal/m ² /h/°C]
計算時間	最大時間	600	[hr]	タンク側壁からの熱損失	算入する	—	
	時間刻み	30	[min]	高さ方向	高さ刻み	0.025	[m]

ボイラーオーバーの危険性

消火後の温度変化 (計算モデル)

消火後の油の冷却時間(計算結果)

直径80mを超えるような大型タンクの場合、風速6~8m/secの時、消火後600時間(25日間)かかって、ようやく約140°Cまで油温が下がる計算結果となった。

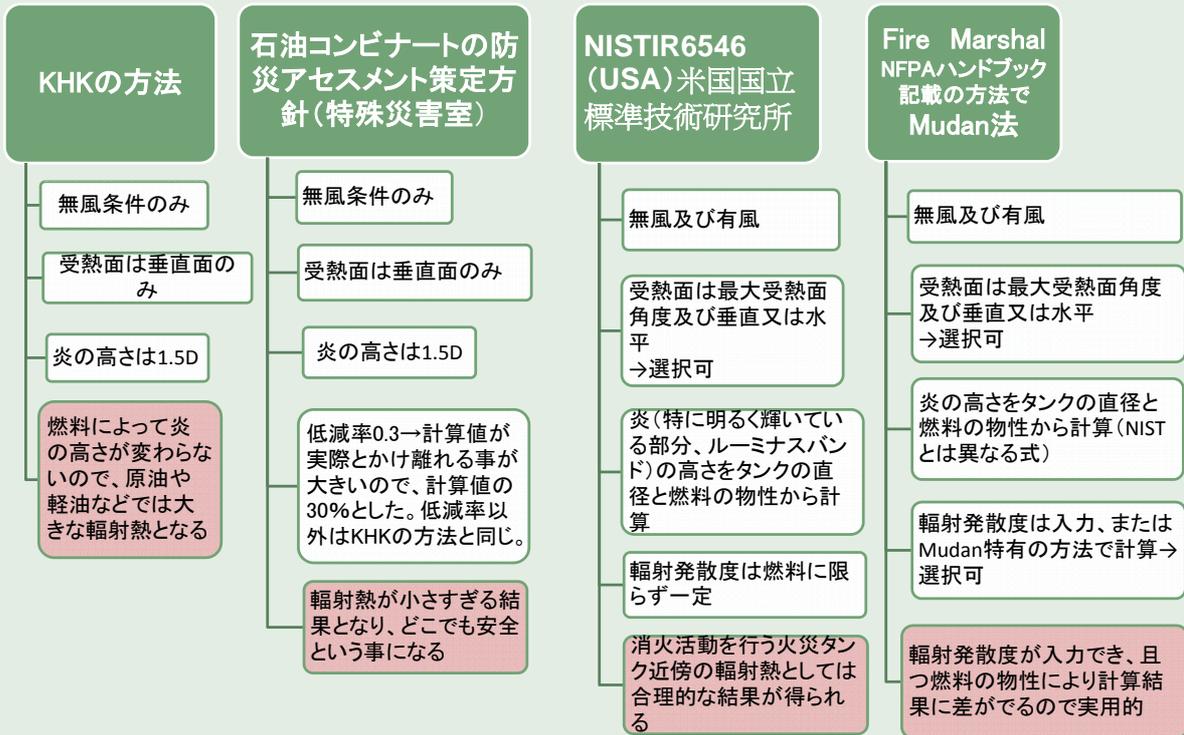
やはり大型タンクだけに、火災後タンク内に滞留する油の冷却には一月近い時間が必要であり、その間の防災対策も充分に考えておく必要がある。

尚、タンク全周に対して連続して放水冷却した場合、消火後300時間(12.5日間)で約125°Cまで冷却できる計算結果が得られている。

放水の効果は大きく、風の場合に比べて、約半分の時間で冷却出来る事がわかる。

火災からの放射熱の推定と対応

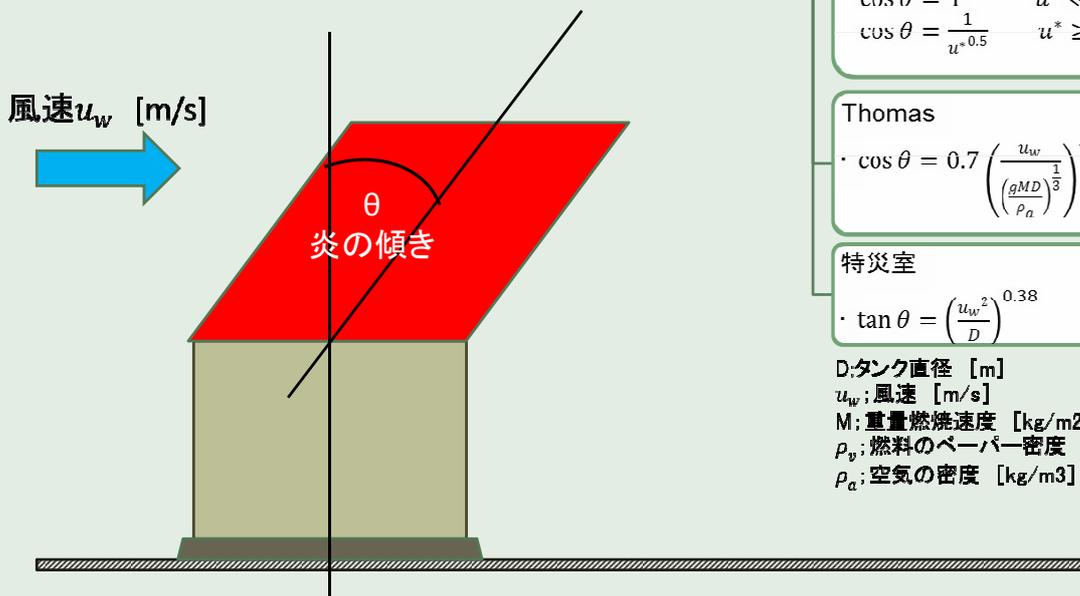
様々な計算方法



火災からの放射熱の推定と対応

風の影響(炎の傾き)

炎の傾きは風速に比例して大きくなり、タンク直径に反比例する。



炎の傾き

AGA

$$\cdot u^* = \frac{u_w}{\left(\frac{gMD}{\rho_v}\right)^{\frac{1}{3}}}$$

$$\cos \theta = 1 \quad u^* \ll 1$$

$$\cos \theta = \frac{1}{u^{*0.5}} \quad u^* \geq 1$$

Thomas

$$\cdot \cos \theta = 0.7 \left(\frac{u_w}{\left(\frac{gMD}{\rho_a}\right)^{\frac{1}{3}}}\right)^{-0.49}$$

特災室

$$\cdot \tan \theta = \left(\frac{u_w^2}{D}\right)^{0.38}$$

D:タンク直径 [m]

u_w : 風速 [m/s]

M: 重量燃焼速度 [kg/m²/s]

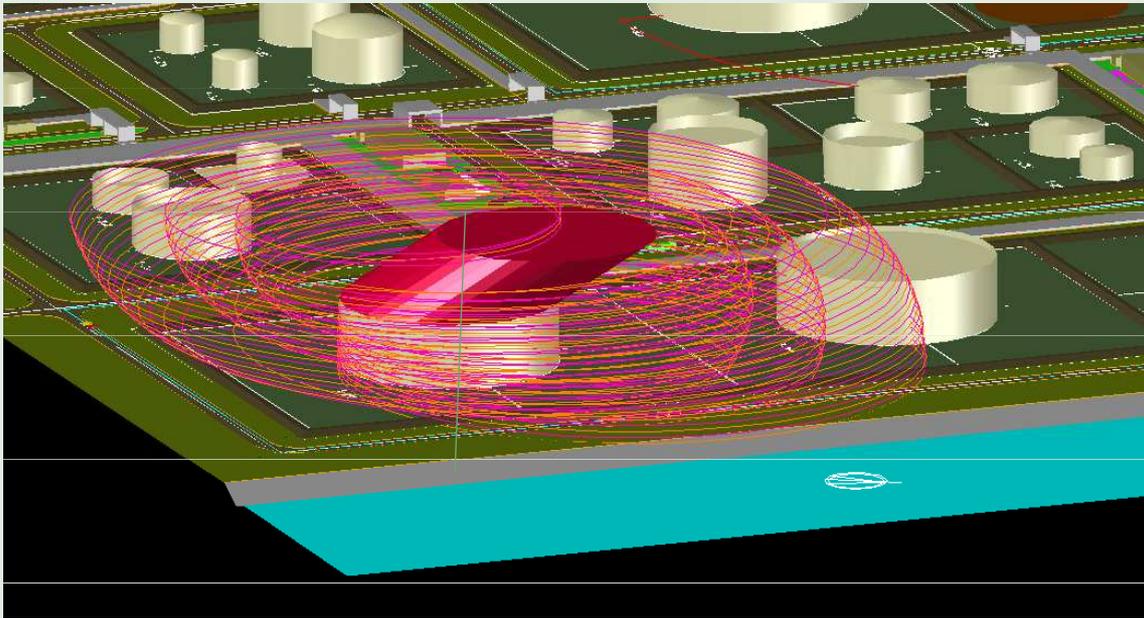
ρ_v : 燃料のペーパー密度 [kg/m³]

ρ_a : 空気の密度 [kg/m³]

火災からの輻射熱の推定と対応

受熱面の高さによる変化と三次元表示

受熱面の高さを地上から炎の高さまで変化させたもので、高さ方向の輻射強度の変化を表示
下の例は輻射強度の等値面を3段階で立体的に表示。



危険物の漏洩とガス拡散

漏洩・液の広がり・蒸発

漏洩のタイプ



危険物の漏洩とガス拡散

漏洩・液の広がり・蒸発

漏洩液体の広がり

- KHK-E-007で採用されている方法 → LNGなど低温液体に使用
- USA. EPAで採用されている方法 → 液体の厚さを一律 1cm として計算する。(米環境保護庁)
- USA.FEMAで採用されている方法 → 液体の広がり面積は漏洩液体量の約1/2乗に比例する。(米連邦緊急事態管理庁)
- ALOHAプログラムで採用されている方法 → KHKで作用されている方法と似た方法であり、広がり速度が早い。(米商務省, 海洋大気局)

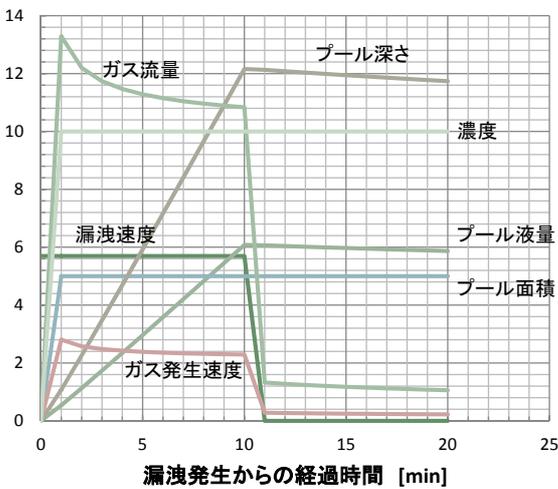
漏洩液体の蒸発

- KHK-E-007で採用されている方法 → LNGなど低温液体に使用されるもので、地面からの熱吸収のみ考慮している。
- USA. EPAで採用されている方法 → 液表面近くの風速により、蒸気圧に応じたガスが運ばれて行くという計算方法
- USA.FEMAで採用されている方法 → 液体の燃焼速度から推算する方法
- USA Air Forceで採用されている方法 → ヒドラジンの実験データとの比較計算方法
- ALOHAプログラムで採用されている方法 → 太陽光からの入熱、大気との熱交換、地面からの熱吸収など全ての熱バランスから蒸発速度を求める方法

危険物の漏洩とガス拡散

漏洩・液の広がり・蒸発

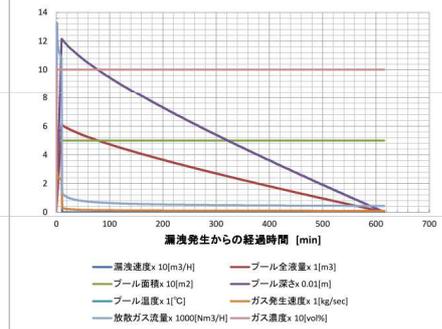
アンモニア液の漏洩と蒸発速度



- 漏洩速度x 10[m³/H]
- プール面積x 10[m²]
- プール温度x 1[°C]
- 放散ガス流量x 1000[Nm³/H]
- プール全液量x 1[m³]
- プール深さx 0.01[m]
- ガス発生速度x 1[kg/sec]
- ガス濃度x 10[vol%]

作成 平成28年02月17日

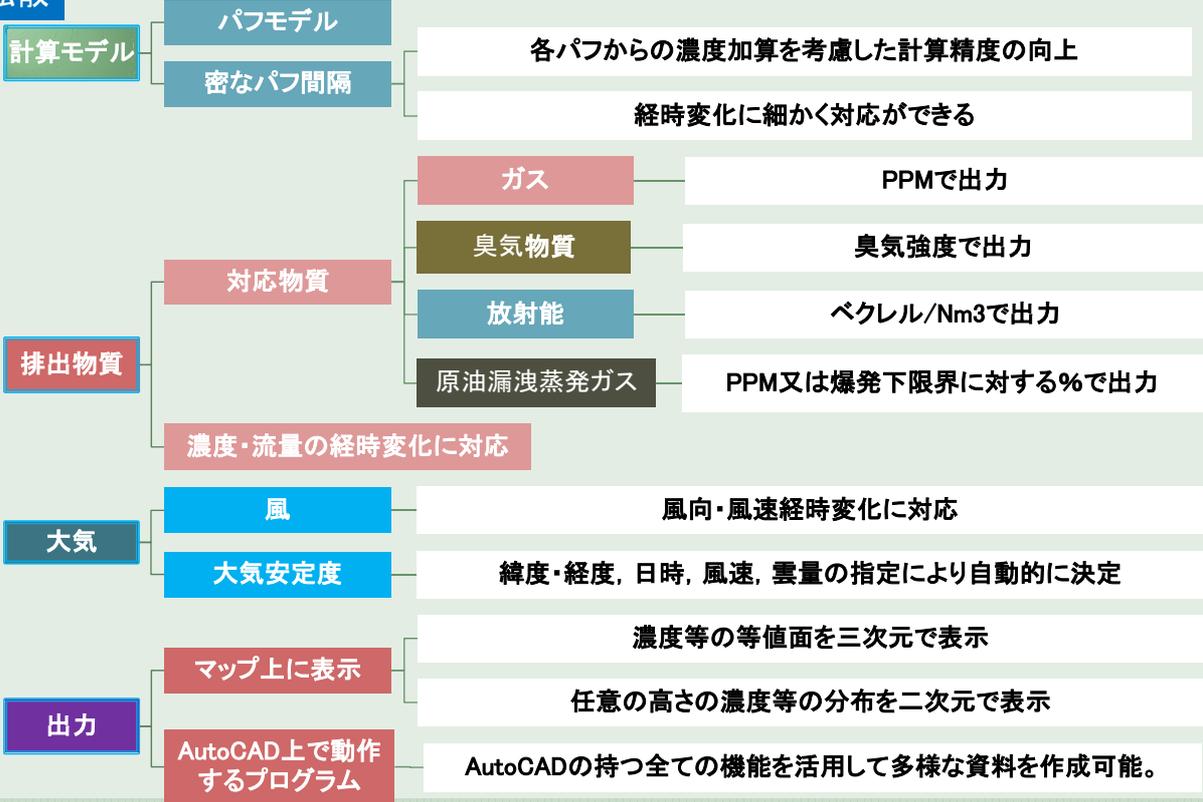
液の漏洩と蒸発速度



計算条件		CND3	
物質名	アンモニア	タンク型式	円筒型タンク
分子量	M 17.03	タンクの直径	Dt 3.0 [m]
大気圧に於ける沸点	Tboil -33.3 [°C]	タンクの高さ(長さ)	Lt 9.0 [m]
液の密度@Ts	ρl 584.5 [kg/m ³]	タンク初期液面高さ	Lhf 2.7 [m]
ガスの密度@Ts,Ps	ρg 7.79 [kg/m ³]	漏洩口の直径	Dn 38.0 [mm]
ガスの粘度@Tatm,Patm	μg 0.09 [kg/m·s]	漏洩口の長さ	Lhole 9.0 [m]
蒸気圧@Ts	PE Ts 11.755 [kg/cm ² A]	流出係数	Cd 0.60
蒸気圧@Tatm	PE Tatm 11.755 [kg/cm ² A]	タンク貯蔵温度	Ts 30.0 [°C]
液の粘度@Tboil	μl 0.0 [kg/m·s]	防炎壁の耐火面積	Ad 50.0 [m ²]
ガスの比熱@Tboil	Cp,g 0.5 [kcal/kg·°C]	防炎壁の風下長さ	Lpd 9.0 [m]
蒸発潜熱@Tboil	ΔHev 327 [kcal/kg]	漏洩時間	θ max 10 [Min]
真熱量	Δcomb 4.443 [kcal/kg]	表示時間間隔	Δθ 1 [Min]
引火点	FP -123.0 [°C]	計算時間間隔	Δθ 1 [sec]
燃発下限界	EPL 16.0 [%]	タンク貯蔵圧力	Ps 10.722 [kg/cm ² G]
燃発上限界	UPL 25.0 [%]	配管長さ	Lp 1.00 [m]
配管内径	Dp 0.000 [m]	計算面積計算方法	1 Ap計算法
計算方法	ALOHA Method	風速(at 10m)	Uw10 6.0 [m/sec]
大気湿度	Tatm 30.0 [°C]	露量	CJ 0.0
湿度	RH 50 [%]	西暦	year 2016
地面の温度	Tgrd 30 [°C]	日時(月,日,時刻)	2 25 12:00
地面の種類	soil concrete	漏洩/経度	35.28 139.38 [度]
プール表面上の風速	u 1.5 [m/sec]		
計算結果			
最大漏洩速度	56.9 [m ³ /H]	漏洩プール最大面積	50.0 [m ²]
漏洩停止時のタンク液面高さ	2.23 [m]	上記に達するまでの経過時間	1.0 [Min]
全液量	9.5 [m ³]	フルール最大液量	0.122 [m]
放散ガスの平均濃度	100.0 [Vol%]	上記に達するまでの経過時間	10.0 [Min]
最大放散ガス流量	13,262.4 [Nm ³ /H]	漏洩物質の最大ガス発生速度	2,800 [kg/sec]
上記に達するまでの経過時間	1.9 [Min]	上記に達するまでの経過時間	1.0 [Min]
平均放散ガス流量	717.5 [Nm ³ /H]	プールの完全蒸発経過時間	615.5 [Min]
大気安定度	C	フラッシュ率	FlashX 0.213
プール平均温度	Tpav -33.300 [°C]	液の密度@Tpav	ρl 681.8 [kg/m ³]
蒸気圧@Tpav	PE Tpav 1.045 [kg/cm ² A]	ガスの密度@Tpav, Pe	ρg 0.8 [kg/m ³]
蒸気圧@Tboil	PE Tboil 327.171 [kg/cm ² A]	液の比熱@Tpav	Cpl 1.0 [kcal/kg·°C]

危険物の漏洩とガス拡散

拡散

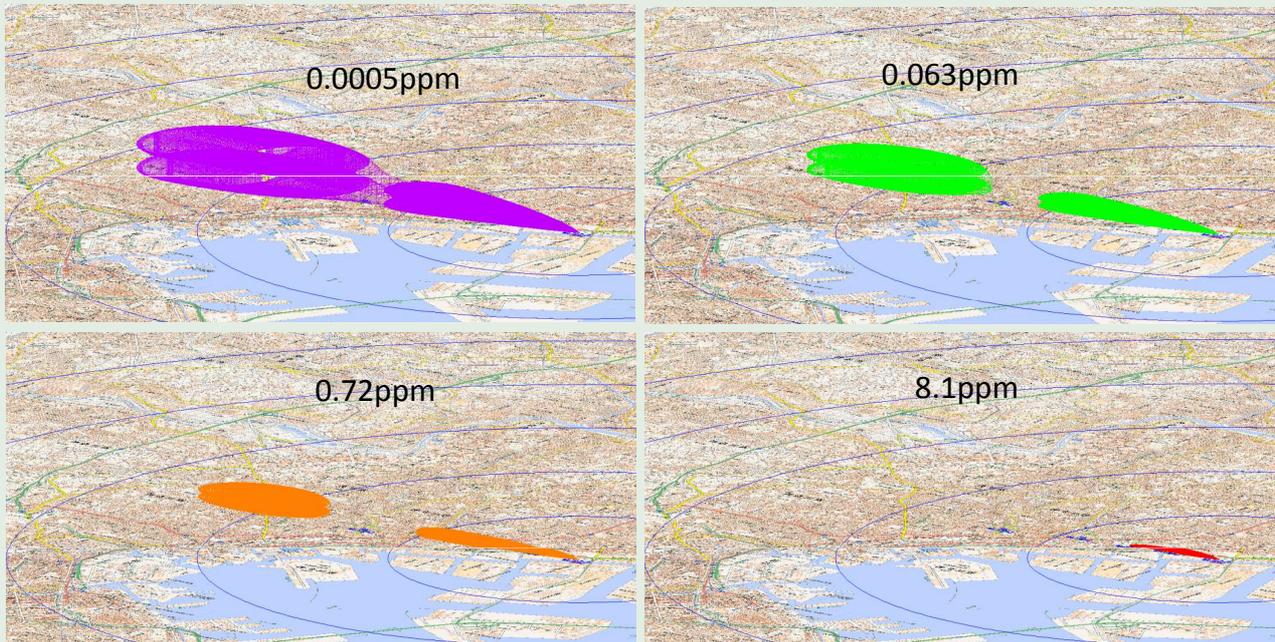


危険物の漏洩とガス拡散

拡散

三次元表示

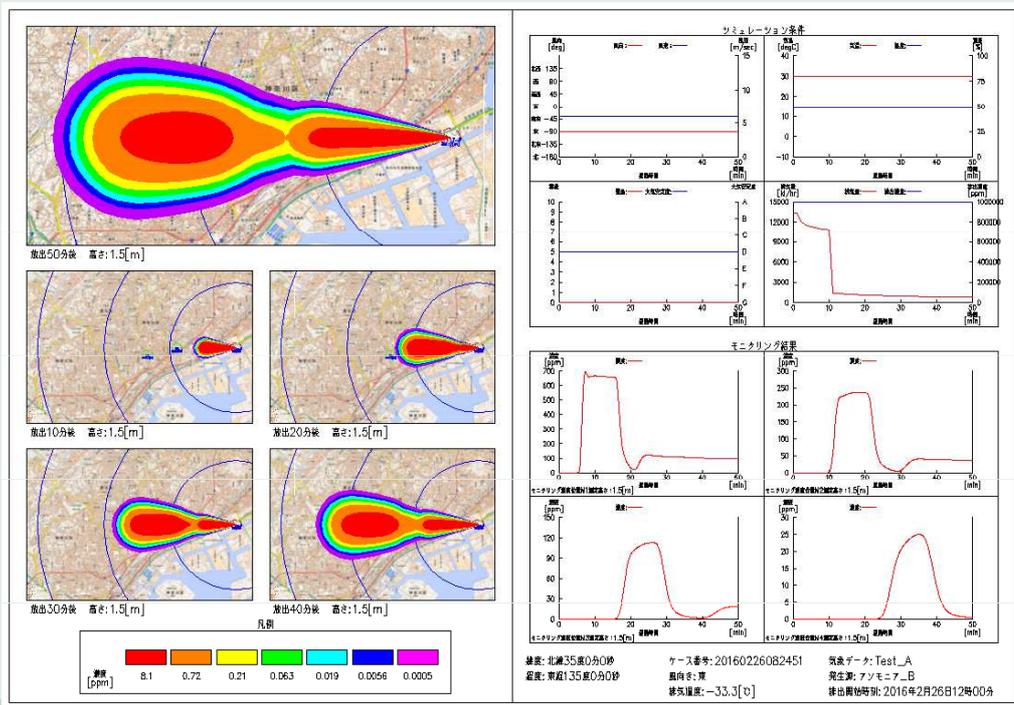
濃度の薄い範囲から濃い順に並べたものです



危険物の漏洩とガス拡散

拡散

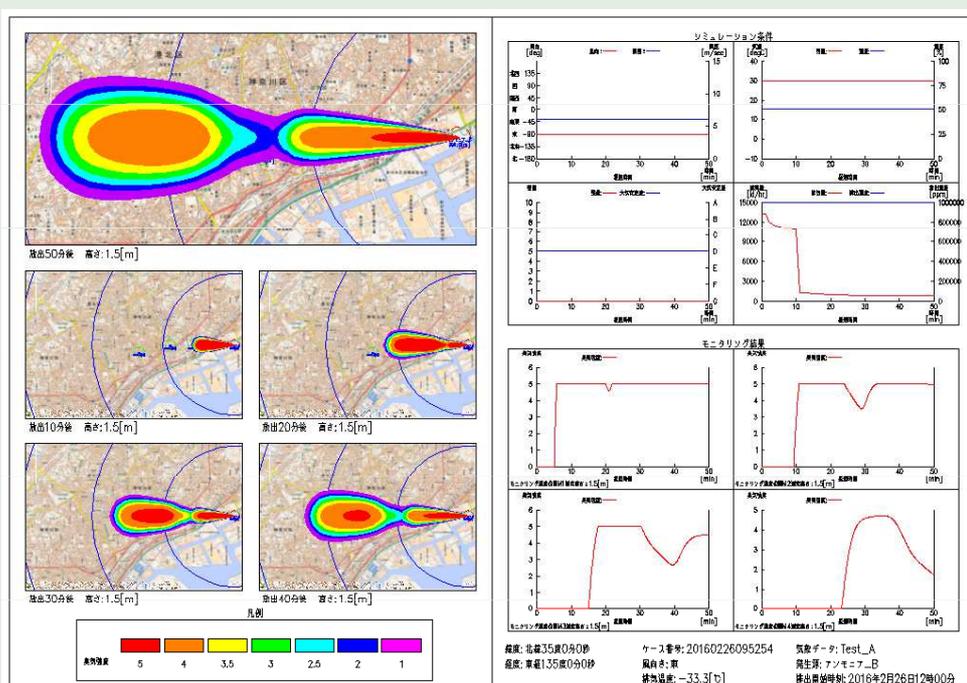
二次元表示



危険物の漏洩とガス拡散

拡散

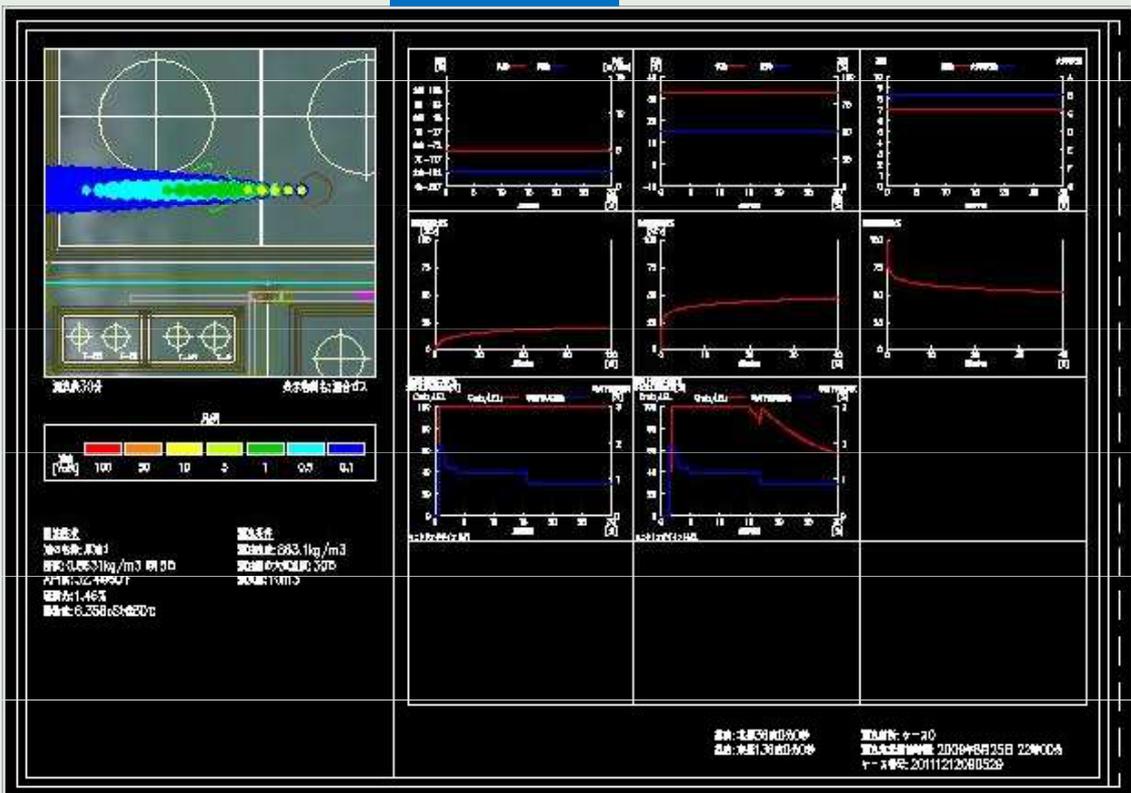
二次元表示(臭気強度表示)



危険物の漏洩とガス拡散

拡散

原油蒸発拡散



危険物の漏洩とガス拡散

拡散

放射能拡散

SPEEDIIによるシミュレーション結果
(原子力規制委員会HPより)

当社拡散プログラムによる
シミュレーション結果



シミュレーション条件《上記何れも同条件》

日時: 2012.12.18 15:00 気温: 10°C 湿度: 50% 風速5m/s 風向き 270度(東)

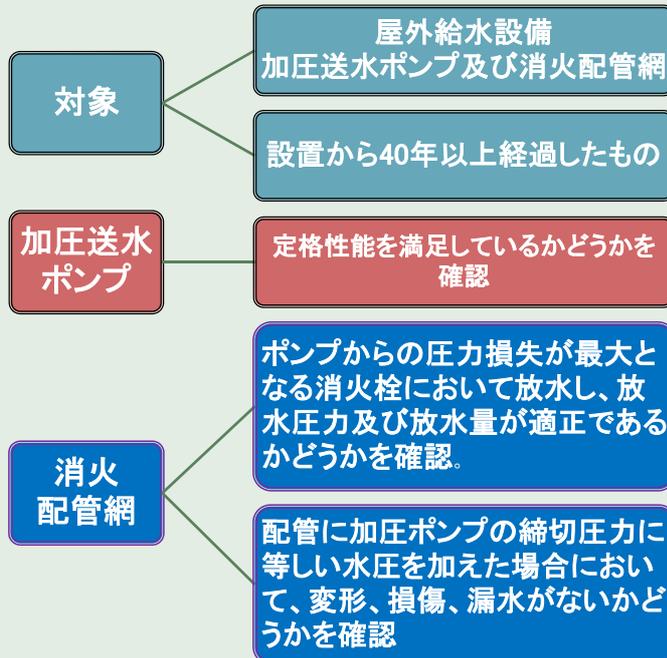
緯度 35.3146 経度 139.4628 測定高さ: 14m

放出条件:ヨウ素 1Bq/h 総放出量:1Bq(1時間放出)

消火配管の経年劣化

石災法通達の内容

通達



実際必要となるデータと作業

- 1) 性能曲線
- 2) 運転試験

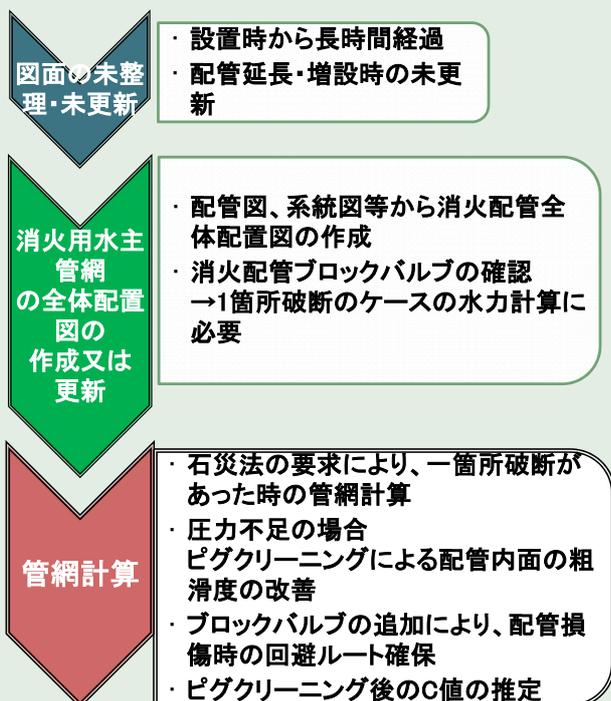
- 1) 1箇所の火災時に必要な水量
(実際は複数箇所在る)
- 2) 各供給ポイントにおける供給必要圧力
- 3) 水力計算書による確認
- 4) 最大水量火災のケースについて放水試験

- 1) 安全弁の作動試験
- 2) 耐圧試験

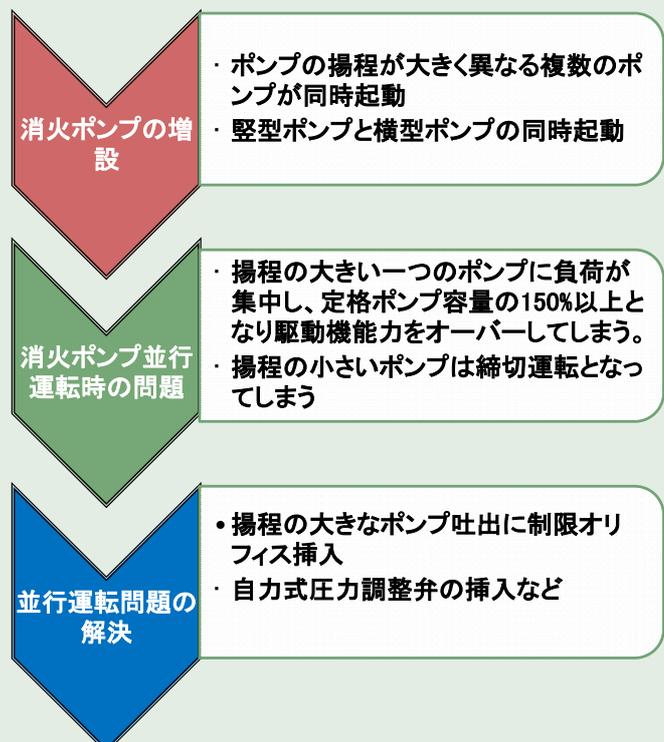
消火配管の経年劣化

推奨する見直し検討

図面の見直しと管網計算



消火ポンプの見直し



消火配管の経年劣化

管網計算

実際は、PIPE NET プログラムを使用して、管網計算により消火主管の圧力損失を計算します。

