

7. 土壌中からの汚染空気の曝露による影響の評価

7.1 リスク評価モデルを用いた曝露量計算による評価

7.1.1 検討目的

本調査は、地下水管理が行われた際に地下水から揮発したベンゼン、シアン化合物等がガスとして隙間や亀裂から建物内に侵入して人の健康や生鮮食料品に影響を与えることが懸念されていることから、食の安全・安心という観点も考慮し、これより高くなることはないと考えられる安全側に見た地上空気のベンゼン、シアン化合物等の濃度および人の空気吸入によるベンゼン、シアン化合物等の曝露量を試算して土壌中からの汚染空気の曝露による影響を評価することを目的とする。

7.1.2 検討の流れ

検討の流れは、図 7.1.1 に示すとおりである。各検討内容等は以下に示すとおりである。

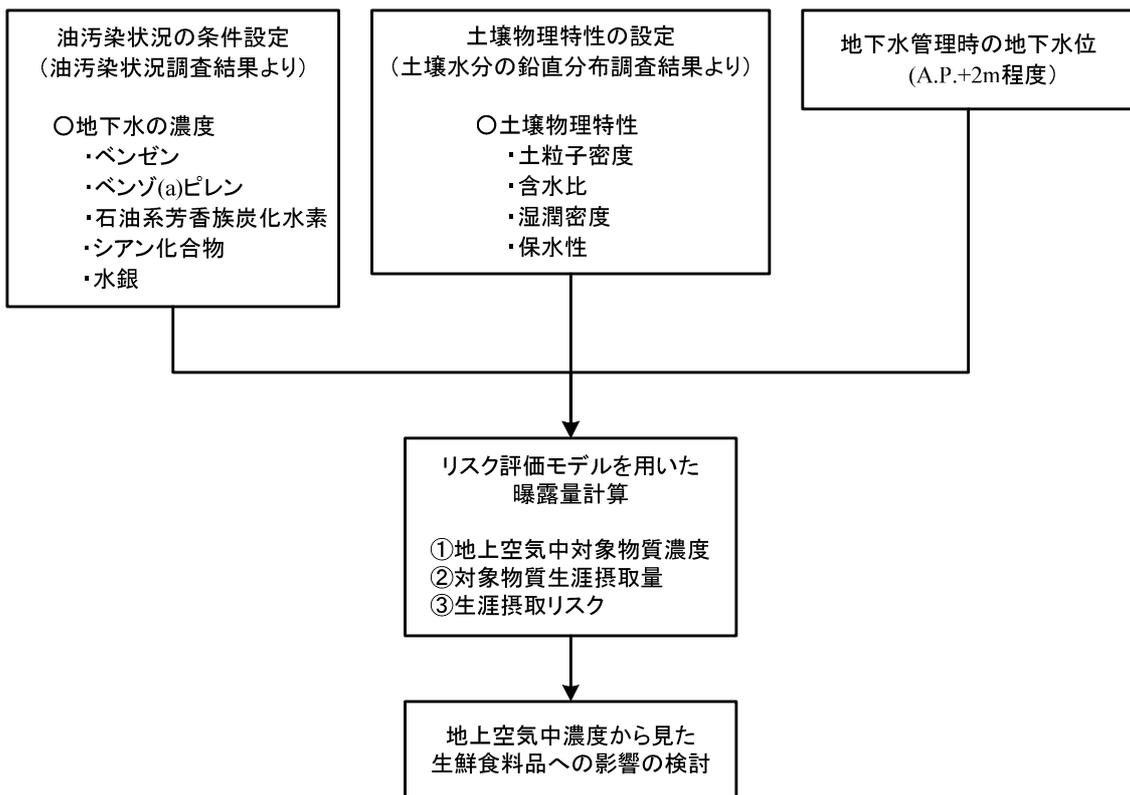


図 7.1.1 土壌からの汚染空気の曝露による影響検討フロー図

7.1.3 検討の内容

(1) リスク評価モデルを用いた曝露量計算

表 7.1.1 に示す揮発性有機化合物（ベンゼン）、シアン化合物、水銀、ベンゾ（a）ピレン、石油系芳香族炭化水素（炭素範囲で区分した 7 画分）について、油汚染状況調査および詳細調査で把握された現状の油汚染状況をもとに、米国等でリスク評価のために一般的に用いられているモデルを用いて、地下水管理によって A.P.+2m に地下水位が維持されている状態における地上空気の状況（これより高くなることはないと考えられる安全側に見た地上空気の濃度の状況）を評価した。

東京都が当初予定していた土壤汚染等の対策では、A.P.+2m より上部で処理基準を超過した土壤は全て処理基準以下に処理されることとなっており、汚染土壤は A.P.+2m 以深、すなわち地下水管理時の地下水位（維持水位）より下の帯水層にのみ存在することとなる。したがって、A.P.+2m 以深の汚染地下水からの汚染空気の曝露による影響を評価すること

表 7.1.1 検討対象物質

対象物質	検討対象とした理由
ベンゼン	<ul style="list-style-type: none"> ・土壤汚染対策法の特定有害物質、環境確保条例の有害物質に指定されており、それぞれ指定区域の指定基準、汚染土壤処理基準（いずれも溶出量 0.01mg/L 以下）が定められている。 ・大気環境基準（年平均値で 0.003mg/m³ 以下）が定められている。
シアン化合物	<ul style="list-style-type: none"> ・土壤汚染対策法の特定有害物質、環境確保条例の有害物質に指定されており、それぞれ指定区域の指定基準、汚染土壤処理基準（いずれも溶出量が検出されないこと、含有量 50mg/kg 以下（遊離シアンとして））が定められている。 ・水中のシアン化合物に含まれるシアン化水素が揮発し、シアン化水素ガスが発生する可能性がある（水中に存在するシアン化合物には遊離シアンと錯塩イオンがあり、遊離シアンに占めるシアン化水素の割合は pH と温度の条件によって、pH9 で 58%、pH8 で 93%、pH7 以下で 99%以上と変化する）。
水銀	<ul style="list-style-type: none"> ・土壤汚染対策法の特定有害物質、環境確保条例の有害物質に指定されており、それぞれ指定区域の指定基準、汚染土壤処理基準（いずれも溶出量 0.0005mg/L 以下（かつアルキル水銀が検出されないこと）、含有量 15mg/kg 以下）が定められている。 ・有害大気汚染物質に係る指針値（年平均値で 0.04 μgHg/m³ 以下）が定められている。
ベンゾ(a)ピレン	<ul style="list-style-type: none"> ・多環芳香族炭化水素（PAH）のうち、中央環境審議会が有害大気汚染物質の優先取組物質としており、世界保健機関（WHO）による飲料水水質ガイドラインにおいてガイドライン値（0.0007mg/L）が規定されている。
芳香族炭化水素画分	<ul style="list-style-type: none"> ・多環芳香族炭化水素（PAH）を含む石油系芳香族炭化水素の濃度を 7 つの炭素範囲（画分）に区分した濃度。 <ul style="list-style-type: none"> - 区分は米国の TPHCWG（Total Petroleum Hydrocarbon Criteria Working Group）による区分に従った。 >EC5-EC7（ベンゼン）、>EC7-EC8（トルエン）、>EC8-EC10、>EC10-EC12、>EC12-EC16、>EC16-EC21、>EC21-EC35

注）芳香族炭化水素画分の EC は、炭素数（等価炭素数：Equivalent Carbon Number）を示す。

で、地下水管理実施時における土壌中からの汚染空気の曝露による影響を評価したことになると思われる。

1) 使用計算方法

米国等で広く用いられている RBCA (Risk-Based Corrective Action: リスクに基づく修復措置) のための ASTM (米国材料試験協会) 規格 (ASTM E 2081-00) に示されている曝露量やリスクの計算方法を用いた。計算には世界的に広く使用されているリスク評価ソフトウェア RBCA Tool Kit Ver.2 (GSI Environmental 社製) を使用した。

図 7.1.2 に、地下水から地上空気への汚染物質の輸送を表す概念図を示す。詳細な算定方法は次ページの枠内のおりであり、露量計算で使用するパラメーターは表 7.1.2 に示すとおり設定した。なお、地上空気の風速については、建築基準法で住宅等の居室に対して換気回数 0.5 回/h 以上とすることが定められていることから、空気交換による希釈効果が最も少ない状態と考えられる空気交換速度 0.5 回/h となるとき値 (地下水汚染プルーム幅を 2 時間かけて通過するときの風速) を設定した。

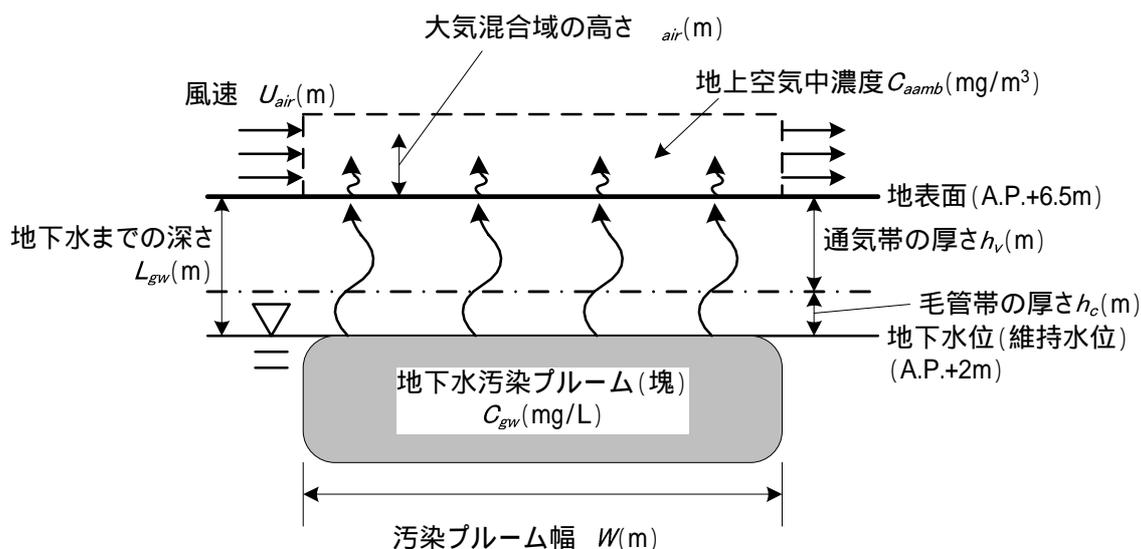


図 7.1.2 汚染地下水から地上空気への汚染物質移動の概念図

2) 土壌中の汚染状況

油汚染状況調査結果および詳細調査の結果をもとに、ベンゼン、シアン化合物、水銀、ベンゾ(a)ピレン、芳香族炭化水素画分の最高濃度を抽出し、本検討における入力値 (地下水中最高濃度) を設定した。

表 7.1.3 に地下水中最高濃度設定値を示す。芳香族炭化水素画分の >EC10-12、>EC12-EC16、>EC16-EC21、>EC21-EC35 については、定量下限値未満であったため、定量下限値を入力値に設定した。

【計算方法】

地下水中対象物質濃度による地上空気中対象物質濃度の算定

任意の物質について、地下水中濃度 C_{gw} (mg/L) のときの地上空気中濃度 C_{aamb} (mg/m³) は、揮発係数 VF_{wamb} (L/m³) を用いて次式のとおり表わされる。

$$C_{aamb} = VF_{wamb} \times C_{gw} \quad (1)$$

ここで、

$$VF_{wamb} = \frac{H}{1 + \left(\frac{U_{air} \times \delta_{air} \times L_{gw}}{D_{ws}^{eff} \times W} \right)} \times 10^3 \quad (2)$$

となり、

$$D_{ws}^{eff} = (h_c + h_v) \times \left(\frac{h_c}{D_{cap}^{eff}} + \frac{h_v}{D_s^{eff}} \right)^{-1} \quad (3)$$

$$D_{cap}^{eff} = D^{air} \times \frac{\theta_{acap}^{3.33}}{\theta_T^2} + \left(\frac{D^{wat}}{H} \right) \times \left(\frac{\theta_{wcap}^{3.33}}{\theta_T^2} \right) \quad (4)$$

$$D_s^{eff} = D^{air} \times \frac{\theta_{as}^{3.33}}{\theta_T^2} + \left(\frac{D^{wat}}{H} \right) \times \left(\frac{\theta_{ws}^{3.33}}{\theta_T^2} \right) \quad (5)$$

である。

地上空気中対象物質濃度による対象物質の生涯曝露量の算定

任意の物質について、地上空気中濃度 C_{aamb} (mg/m³) のときの吸入による生涯曝露量 EA_{life} (mg) は次式により求められる。

$$EA_{life} = C_{aamb} \times EF \times ED \times IR_{air} \quad (6)$$

生涯リスクの算定

発がん性物質(ベンゼン、ベンゾ(a)ピレン)の地上空気からの吸入による生涯リスク(発がんリスク $Risk$) は次式により算定される。

$$Risk = \frac{C_{gw} \times EF \times ED \times URF \times VF_{wamb} \times 1000}{AT_c \times 365} \quad (7)$$

非発がん性物質(シアン化合物、水銀、芳香族炭化水素画分)の地上空気からの吸入による生涯リスク(ハザード比 HQ) は次式により算定される。

$$HQ = \frac{C_{gw} \times EF \times ED \times VF_{wamb}}{RfC \times AT_n \times 365} \quad (8)$$

人の健康リスクからみた目標地下水濃度の算定

発がん性物質の目標地下水濃度 $RBSL_{gw}$ は、次式より算定される。

$$RBSL_{gw} = \frac{TR \times AT_c \times 365}{EF \times ED \times URF \times 1000 \times VF_{wamb}} \quad (9)$$

非発がん性物質の目標地下水濃度 $RBSL_{gw}$ は、次式より算定される。

$$RBSL_{gw} = \frac{THQ \times RfC \times AT_n \times 365}{EF \times ED \times VF_{wamb}} \quad (10)$$

表 7.1.2 設定パラメーター

記号	定義 (単位)	設定値	設定理由
AT_c	発がん性物質の平均時間 (yr)	70	=生涯年数
AT_n	非発がん性物質の平均時間 (yr)	70	= EF
C_{aamb}	大気中濃度 (mg/m^3)	-	式(1)で算定
C_{gw}	地下水中濃度 (mg/L)	最高値	追加調査結果、詳細調査結果
D^{air}	気相中の拡散係数 (cm^2/s)	物質毎	RBCA Tool Kit デフォルト値
D^{wat}	液相中の拡散係数 (cm^2/s)	物質毎	RBCA Tool Kit デフォルト値
D_{cap}^{eff}	毛管帯における有効拡散係数 (cm^2/s)	-	式(4)で算定
D_s^{eff}	通期帯における有効拡散係数 (cm^2/s)	-	式(5)で算定
D_{ws}^{eff}	不飽和帯における有効拡散係数 (cm^2/s)	-	式(3)で算定
EA_{life}	生涯曝露量 (mg)	-	式(6)で算定
ED	曝露期間 (d/yr)	365	
EF	曝露頻度 (yr)	70	(子供6年、大人64年)
H	ヘンリー定数(-)	物質毎	RBCA Tool Kit デフォルト値
HQ	ハザード比	-	式(8)で算定
IR_{air}	人の日呼吸量 (空気吸入量) (m^3/d)	15	ダイオキシン類土壌環境基準設定で使用
L_{gw}	地下水までの深さ (cm)	450	A.P.+2m に水位
$RBSL_{gw}$	目標地下水中濃度 (mg/L)	-	式(9)または式(10)で算定
RfC	参照濃度 (mg/m^3)	物質毎	RBCA Tool Kit デフォルト値
$Risk$	発がんリスク	-	式(7)で算定
THQ	目標ハザード比	1	設定
TR	目標発がんリスク	1×10^{-5}	設定
U_{air}	地上の風速 (cm/s)	0.625	建築基準法に定める住宅等の居室の最低換気回数 0.5 回/h より設定
URF	ユニットリスク (-)	物質毎	RBCA Tool Kit デフォルト値
VF_{wamb}	揮発係数 (L/m^3)	-	式(2)で算定
W	地下水汚染ブルーム幅 (cm)	4500	RBCA Tool Kit デフォルト値
h_c	毛管帯の厚さ (cm)	100	土壌の保水性試験結果
h_v	通気帯の厚さ (cm)	350	L_{gw} 、 h_c より求まる
T	間隙率	地点毎	土壌の保水性試験結果
as	土壌水帯の気相率(-)	地点毎	土壌の保水性試験結果
ws	土壌水帯の体積含水率(-)	地点毎	土壌の保水性試験結果
$acap$	毛管帯の気相率(-)	地点毎	土壌の保水性試験結果
$wcap$	毛管帯の体積含水率(-)	地点毎	土壌の保水性試験結果
air	大気混合域の高さ (cm)	200	ASTME 2081 デフォルト値

表 7.1.3 地下水中最高濃度設定値

対象物質	地下水中最高濃度 入力値 (mg/L)	油汚染状況調査等 実測最高濃度 (mg/L)	油汚染状況調査等 最高濃度検出地点
ベンゼン	100	100	D10-1 (詳細調査)
ベンゾ(a)ピレン	0.00045	0.00045	L37-2 (地下水中間深度)
シアン化合物	13	13	D11-6 (地下水中間深度)
水銀	0.0006	0.0006	D11-5 (地下水中間深度)
芳香族炭化水素	>EC 5 -EC 7	100	D10-1 (詳細調査)のベンゼン濃度
	>EC 7 -EC 8	31	D11-5 (地下水先端深度)
	>EC 8 -EC10	14	D11-5 (地下水先端深度)
	>EC10-EC12	10	-
	>EC12-EC16	10	-
	>EC16-EC21	10	-
	>EC21-EC35	10	-

3) 土壌物理特性のケース設定

土壌の物理特性に関するパラメーターについて、土壌水分の鉛直分布調査で行われた保水性試験の結果、図 7.1.3 に示す 6 地点の土壌について水分特性曲線が得られている。これらの平均値を求めて作成した水分特性曲線は図中の AVG のとおりとなる。

表 7.1.4 に設定した土壌物理特性 7 ケースを示す。間隙率 τ には pF0 のときの体積含水率を、毛管帯の体積含水率 w_{cap} には pF0 のときの体積含水率と pF1.8 のときの体積含水率の平均値を、通気帯の体積含水率 w_s には pF2.5 のときの体積含水率をそれぞれ設定した。また、毛管帯の厚さ h_c は水分特性曲線の形状より pF2 (水柱高で 100cmH₂O) に設定し、地下水までの深さ L_{gw} は地下水管理時の維持水位 (A.P.+2m) までの深さとした。

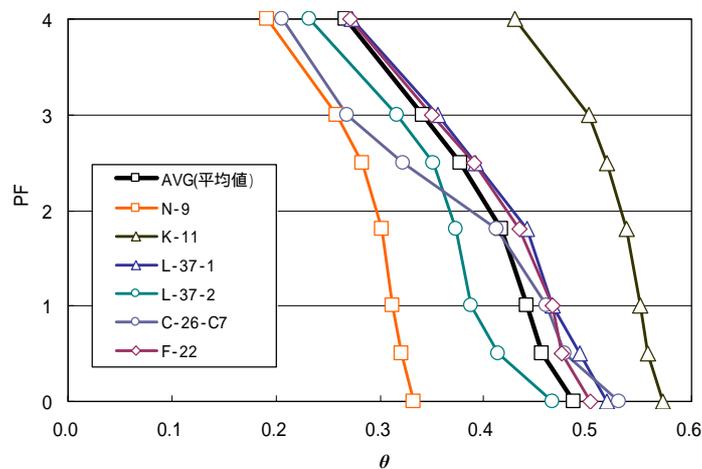


図 7.1.3 各地点における土壌の土壌水分特性曲線

表 7.1.4 土壌物理特性の設定ケース

ケース	地点	間隙率 T (-)	体積含水率		気相率		地下水までの深さ L_{gw} (cm)	毛管帯の厚さ h_c (cm)
			通気帯 w_s (-)	毛管帯 w_{cap} (-)	通気帯 a_s (-)	毛管帯 a_{cap} (-)		
A	AVG (平均)	0.487	0.377	0.452	0.110	0.035	450	100
B	N-9	0.332	0.284	0.317	0.048	0.015		
C	K-11	0.572	0.519	0.5545	0.053	0.0175		
D	L-37-1	0.518	0.392	0.4795	0.126	0.0385		
E	L-37-2	0.467	0.352	0.4208	0.115	0.0465		
F	C-26-C7	0.530	0.323	0.4715	0.207	0.0585		
G	F-22	0.503	0.391	0.469	0.112	0.034		

4) 物質毎のパラメーター設定

物質毎の物理化学特性および有害性に関するパラメーターは、使用した RBCA Tool Kit の中でデータベースとして整備されている値(表 7.1.5)(米国環境保護庁(U.S.EPA)、テキサス州、TPHCWG が値の出典元となっている)および米国環境保護庁の統合リスク情報システム(IRIS)に示されている値を設定値として用いた。

- ・芳香族炭化水素画分の>EC16-EC21、>EC21-EC35 については、揮発性がないとして吸入による参照濃度(RfC)が推薦されておらず、揮発による人の健康リスクは無視できると考えられる。
- ・シアン化合物について、RBCA Tool Kit の中にデータベースとして整備されている値はいずれの出典においてもヘンリー定数(H)=0 となっており、地下水からの揮発は評価対象とされていない。
- ・しかし、シアン化水素ガスが地下水から揮発する可能性が考えられることから、既存文献よりシアン化水素のヘンリー定数(H)を引用し、シアン化合物の H として使用した。
- ・したがって、地下水中のシアン化合物が全てシアン化水素であり、その地下水中のシアン化水素からシアン化水素ガスが揮発すること想定した、安全側の評価を行ったことになる。

図 7.1.4 に示すように、水中のシアン化合物は遊離型シアンおよび錯塩型から構成され、遊離型シアンはシアン化水素およびシアン化物イオンから構成される。遊離型シアンに占めるシアン化水素の割合は pH と温度の条件によって変化し、pH9 で 58%、pH8 で 93%、pH7 以下で 99% 以上がシアン化水素として存在する。このような地下水中のシアン化合物に占めるシアン化水素の割合に対して、曝露量計算では地下水中のシアン化合物が全てシアン化水素として存在し、それがシアン化水素ガスとして揮発するという安全側の評

価を行った。

表 7.1.5 対象物質毎のパラメーター設定値

対象物質	水溶解度 (20-25) (mg/L)	ヘンリー定数 (20-25) $H(-)$	拡散係数		吸入 RfC (mg/m^3)	吸入 URF ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) ⁻¹	
			空気中 D^{air} (cm^2/s)	水中 D^{wat} (cm^2/s)			
ベンゼン	1770	2.27×10^{-1}	8.80×10^{-2}	9.80×10^{-6}	-	0.0000078	
ベンゾ(a)ピレン	0.00162	4.70×10^{-5}	8.70×10^{-2}	8.60×10^{-6}	-	0.00088	
シアン化合物	100000	5.50×10^{-3} a)	5.21×10^{-1}	2.28×10^{-5}	0.003	-	
水銀	0.03	4.74×10^{-1}	3.07×10^{-2}	6.30×10^{-6}	0.0003	-	
芳香族炭化水素	>EC 5 -EC 7	1800	2.32×10^{-1}	4.30×10^{-2}	9.00×10^{-6}	0.03	-
	>EC 7 -EC 8	520	2.77×10^{-1}	1.00×10^{-1}	1.00×10^{-5}	1	-
	>EC 8 -EC10	65	4.80×10^{-1}	1.00×10^{-1}	1.00×10^{-5}	0.2	-
	>EC10-EC12	25	1.35×10^{-1}	1.00×10^{-1}	1.00×10^{-5}	0.2	-
	>EC12-EC16	5.8	5.12×10^{-2}	1.00×10^{-1}	1.00×10^{-5}	0.2	-
	>EC16-EC21	0.65	1.33×10^{-2}	1.00×10^{-1}	1.00×10^{-5}	-	-
	>EC21-EC35	0.0066	6.60×10^{-4}	1.00×10^{-1}	1.00×10^{-5}	-	-

注：a) シアン化合物のヘンリー定数は、「有害性評価書 Ver. 0.4, No.129 無機シアン化合物(錯塩及びシアン酸塩を除く)」（新エネルギー・産業技術総合開発機構）に整理されているシアン化水素の $H (=13.5 \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{mol})$ を無次元化して用いた。

(2) 地上空気中濃度から見た生鮮食料品への影響の評価

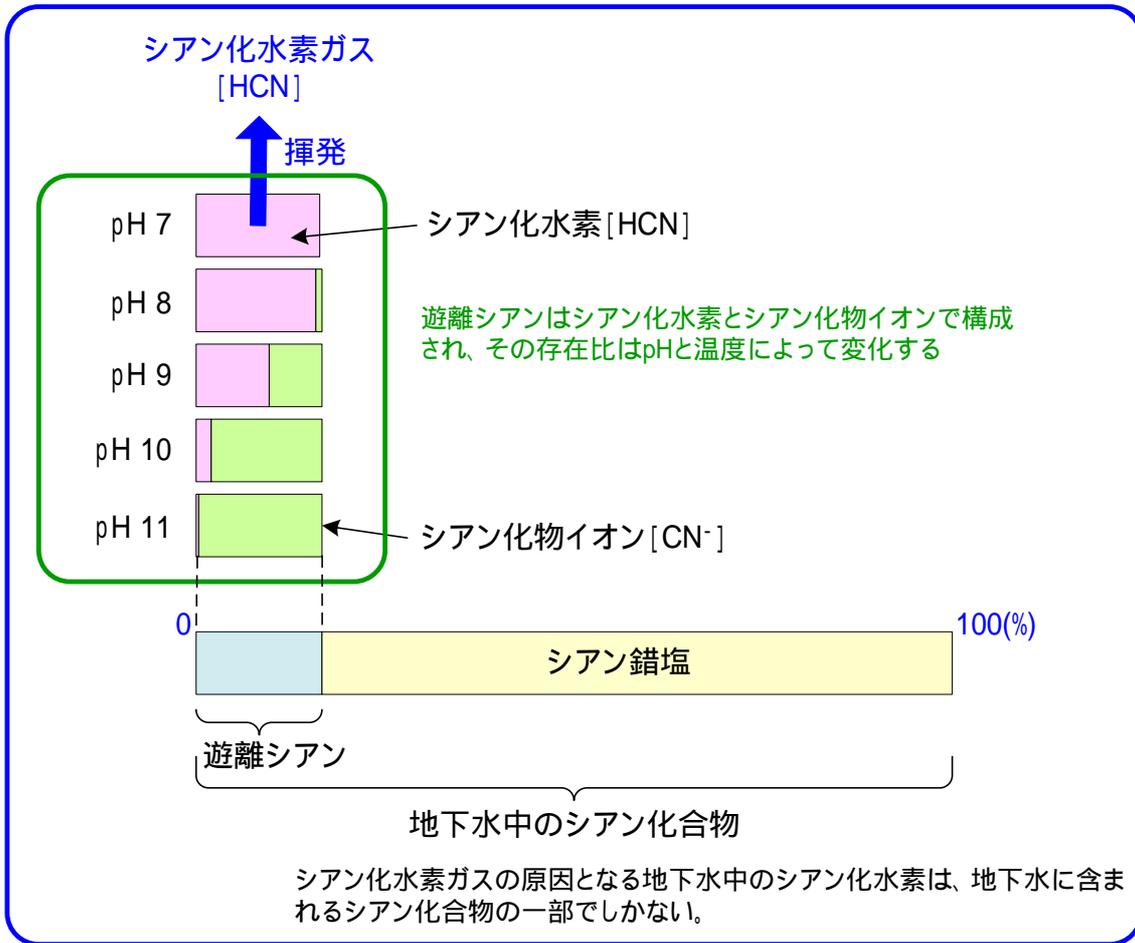
地下水から揮発したベンゼンおよびシアン化合物がガスとして隙間や亀裂から地上での生鮮食料品への影響について、生鮮食料品に付着した水分中の濃度が地上空気中の濃度と平衡になった状態を想定し、地上空気中に存在する対象物質の濃度をもとに、生鮮食料品に付着した水分中の濃度を算定した。算定方法は次の枠内のとおりである。

【計算方法】

地上空気中濃度 C_{aamb} (mg/m^3) と気液平衡状態にある水分中濃度 C_w (mg/L) は、ヘンリー定数 $H(-)$ を用いて次式により算定される。

$$C_w = \frac{C_{aamb}}{H} \times \frac{1}{1000} \quad (11)$$

地下水中に存在するシアン化合物の形態



曝露量計算で設定した条件

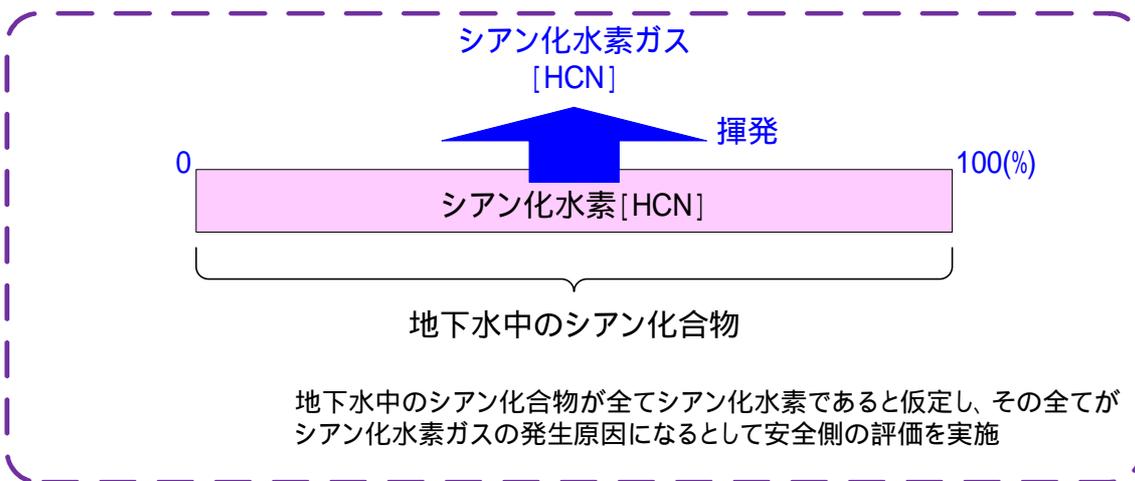


図 7.1.4 地下水中に存在するシアン化合物の形態および曝露量計算における設定条件

7.1.4 検討結果

(1) リスク評価モデルを用いた曝露量の計算結果

リスク評価モデルを用いた曝露量の計算結果を以下に示す。なお、今回行った計算は、地下水汚染ブルームが全て対象物質の最高濃度となっている状態であり、その汚染地下水から上方に拡散した対象物質が全て地表面から地上空气中に拡散し、建築基準法で定められている住宅の居室としての最低限の空気交換条件の下でしか希釈されないという、非常に安全側に見た評価（最大限危険な状態を想定した評価）を行うものである。

1) 地上空气中濃度および生涯曝露量の算定

ベンゼン、シアン化合物、水銀、ベンゾ(a)ピレン、芳香族炭化水素画分について、地下水中最高濃度をもとにこれより高くなることはないと考えられる安全側に見た地上空气中の濃度を求めた結果を表 7.1.6 に、そのときの各物質の生涯曝露量を求めた結果を表 7.1.7 に示す。

大気環境基準が設定されているベンゼンについて、算定された地上空气中濃度を大気環境基準（年平均値で $0.003\text{mg}/\text{m}^3$ 以下）と比較すると、いずれの土壌特性においても大気環境基準を上回る結果が得られた。

有害大気汚染物質に係る指針値が設定されている水銀については、算定された地上空气中濃度を指針値（年平均値で $0.04\ \mu\text{gHg}/\text{m}^3$ 以下）と比較すると、いずれの土壌特性においても指針値に適合する結果が得られた。

2) 人の健康リスクの算定

ベンゼン、シアン化合物、水銀、ベンゾ(a)ピレン、芳香族炭化水素画分について、上記生涯曝露量をもとに地上空気を吸入することによる人の健康リスクを算定した結果を表 7.1.8 に示す。発がん性物質であるベンゼンおよびベンゾ(a)ピレンについては発がんリスク *Risk* を算定し、シアン化合物、水銀および芳香族炭化水素画分については慢性毒性に対してハザード比 *HQ* を算定した。

ベンゼンについては、いずれのケースにおいても *Risk* が目標リスク $TR (=1 \times 10^{-5})$ を上回るという結果が得られた。

シアン化合物については、多くのケースで *HQ* が目標ハザード比 $THQ (=1)$ を上回るという結果が得られた。

ベンゾ(a)ピレンについては、いずれのケースにおいても *Risk* が目標リスク $TR (=1 \times 10^{-5})$ 未満であり、人の健康リスクは許容されるレベルになるという結果が得られた。

水銀および芳香族炭化水素画分については、いずれのケースにおいても *HQ* が目標ハザード比 $THQ (=1)$ 未満であり、人の健康リスクは許容されるレベルになるという結果が得られた。

3) 目標地下水中濃度の算定

人の健康リスクの観点から、*TR* または *THQ* を達成する場合の目標地下水中濃度を算定した。表 7.1.9 に各物質の地下水中濃度を示す。

油汚染状況調査等および詳細調査における実測最高濃度が目標地下水中濃度を上回ったのは、ベンゼンおよびシアン化合物であった。

ベンゼンについて、地下水中のベンゼン濃度を目標地下水中ベンゼン濃度である 0.45 ~ 3.1mg/L (平均的な土壌特性下で 1.1mg/L) 以下にすることによって地上空气中ベンゼン濃度は 0.0013 mg/m³ 以下となり、ベンゼンの大気環境基準(年平均値で 0.003mg/m³ 以下)を上回ることがなく、人の健康リスク上も問題のないレベルで地上空気環境を維持することが可能であるという結果が得られた。

シアン化合物について、地下水中シアン化合物濃度を目標地下水中シアン化合物濃度である 1.6 ~ 8.8mg/L (平均的な土壌特性下で 3.7mg/L) 以下にすることによって地上空气中のシアン化合物濃度は $RfC (=0.003\text{mg}/\text{m}^3)$ 以下となり、人の健康リスク上問題のないレベルで地上空気環境を維持することが可能であるという結果が得られた。

(2) 地上空气中濃度から見た生鮮食料品への影響の検討結果

上記(1)、3)で求められた目標地下水中ベンゼン濃度(平均的な土壌特性下で 1.1mg/L)および目標地下水中シアン化合物濃度(平均的な土壌特性下で 3.7mg/L)のとき、式(1)~(5)より求められる地上空气中ベンゼン最高濃度は 0.0013mg/m³、地上空气中シアン化合物最高濃度は 0.003mg/m³ となり、式(11)より求められる生鮮食料品に付着した水分中のベンゼン濃度は $5.7 \times 10^{-6}\text{mg}/\text{L}$ 、シアン化合物濃度は $5.5 \times 10^{-4}\text{mg}/\text{L}$ となる。これらの値はベンゼンについて飲料水の水質基準(0.01mg/L 以下)の 1/1000 未満、シアン化合物について飲料水の水質基準(シアン化物イオンおよび塩化シアン、0.01mg/L 以下)の 1/10 未満と非常にわずかな濃度であり、食の安全・安心の観点から見ても悪影響が及ぼされる可能性は小さいと考えられる。

なお、実際には、地下水の対策により地下水中のベンゼンおよびシアン化合物の濃度を排水基準または地下水環境基準に適合させることとしている。したがって、排水基準(ベンゼン: 0.1mg/L、シアン化合物: 1mg/L)に適合する状態となった場合には、生鮮食料品に付着した水分中の濃度がベンゼンで $1.8 \times 10^{-7} \sim 1.2 \times 10^{-6}\text{mg}/\text{L}$ (平均的な土壌特性下で $5.3 \times 10^{-7}\text{mg}/\text{L}$)、シアン化合物で $6.2 \times 10^{-5} \sim 3.3 \times 10^{-4}\text{mg}/\text{L}$ (平均的な土壌特性下で $1.5 \times 10^{-4}\text{mg}/\text{L}$) にまで低下する。また、地下水環境基準(ベンゼン: 0.01mg/L 以下、シアン化合物: 検出されないこと (=0.1mg/L 未満))に適合する状態になった場合には、生鮮食料品に付着した水分中の濃度はさらにその 1/10 のレベルにまで低下することとなる。

表 7.1.6 各ケースにおける対象物質毎の地上空気中濃度

ケース	地点	地上空気中濃度 (mg/m ³)											
		ベンゼン	ベンゾ(a) ピレン	シアン 化合物	水銀	芳香族炭化水素画分							
						>EC5-EC7	>EC7-EC8	>EC8-EC10	>EC10-EC12	>EC12-EC16	>EC16-EC21	>EC21-EC35	
A	AVG	1.2 × 10 ⁻¹	5.9 × 10 ⁻⁸	1.0 × 10 ⁻²	4.8 × 10 ⁻⁷	1.3 × 10 ⁻¹	4.3 × 10 ⁻²	2.6 × 10 ⁻²	1.0 × 10 ⁻²	6.8 × 10 ⁻³	3.6 × 10 ⁻³	1.6 × 10 ⁻³	
B	N-9	4.1 × 10 ⁻²	4.8 × 10 ⁻⁸	4.4 × 10 ⁻³	1.7 × 10 ⁻⁷	4.4 × 10 ⁻²	1.5 × 10 ⁻²	8.3 × 10 ⁻³	3.5 × 10 ⁻³	2.3 × 10 ⁻³	1.5 × 10 ⁻³	1.2 × 10 ⁻³	
C	K-11	4.8 × 10 ⁻²	1.2 × 10 ⁻⁷	9.0 × 10 ⁻³	1.9 × 10 ⁻⁷	5.2 × 10 ⁻²	1.7 × 10 ⁻²	9.7 × 10 ⁻³	4.3 × 10 ⁻³	3.5 × 10 ⁻³	3.0 × 10 ⁻³	2.9 × 10 ⁻³	
D	L-37-1	1.4 × 10 ⁻¹	6.0 × 10 ⁻⁸	1.3 × 10 ⁻²	5.6 × 10 ⁻⁷	1.5 × 10 ⁻¹	5.0 × 10 ⁻²	3.0 × 10 ⁻²	1.2 × 10 ⁻²	8.1 × 10 ⁻³	4.3 × 10 ⁻³	1.7 × 10 ⁻³	
E	L-37-2	1.6 × 10 ⁻¹	5.1 × 10 ⁻⁸	1.1 × 10 ⁻²	6.8 × 10 ⁻⁷	1.8 × 10 ⁻¹	6.4 × 10 ⁻²	4.4 × 10 ⁻²	1.3 × 10 ⁻²	7.5 × 10 ⁻³	3.8 × 10 ⁻³	1.4 × 10 ⁻³	
F	C-26-C7	2.8 × 10 ⁻¹	3.3 × 10 ⁻⁸	2.4 × 10 ⁻²	1.2 × 10 ⁻⁶	3.1 × 10 ⁻¹	1.1 × 10 ⁻¹	7.7 × 10 ⁻²	2.2 × 10 ⁻²	1.4 × 10 ⁻²	8.2 × 10 ⁻³	1.8 × 10 ⁻³	
G	F-22	1.2 × 10 ⁻¹	6.2 × 10 ⁻⁸	1.1 × 10 ⁻²	4.8 × 10 ⁻⁷	1.3 × 10 ⁻¹	4.2 × 10 ⁻²	2.5 × 10 ⁻²	1.0 × 10 ⁻²	7.0 × 10 ⁻³	3.7 × 10 ⁻³	1.7 × 10 ⁻³	
大気環境基準		3.0 × 10 ⁻³	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
有害大気汚染物質 指針値		-	-	-	4.0 × 10 ⁻⁵ (mgHg/m ³)	-	-	-	-	-	-	-	

7-12

表 7.1.7 各ケースにおける対象物質毎の地上空気経由の生涯曝露量

ケース	地点	生涯曝露量 (g)											
		ベンゼン	ベンゾ(a) ピレン	シアン 化合物	水銀	芳香族炭化水素画分							
						>EC5-EC7	>EC7-EC8	>EC8-EC10	>EC10-EC12	>EC12-EC16	>EC16-EC21	>EC21-EC35	
A	AVG	46	2.3 × 10 ⁻⁵	3.8	1.8 × 10 ⁻⁴	50	16	10	3.8	2.6	1.4	0.61	
B	N-9	16	1.8 × 10 ⁻⁵	1.7	6.5 × 10 ⁻⁵	17	5.7	3.2	1.3	0.88	0.57	0.46	
C	K-11	18	4.6 × 10 ⁻⁵	3.4	7.3 × 10 ⁻⁵	20	6.5	3.7	1.6	1.3	1.1	1.1	
D	L-37-1	54	2.3 × 10 ⁻⁵	5.0	2.1 × 10 ⁻⁴	57	19	11	4.6	3.1	1.6	0.65	
E	L-37-2	61	2.0 × 10 ⁻⁵	4.2	2.6 × 10 ⁻⁴	69	25	17	5.0	2.9	1.5	0.54	
F	C-26-C7	110	1.3 × 10 ⁻⁵	9.2	4.6 × 10 ⁻⁴	120	42	30	8.4	5.4	3.1	0.69	
G	F-22	46	2.4 × 10 ⁻⁵	4.2	1.8 × 10 ⁻⁴	50	16	9.6	3.8	2.7	1.4	0.65	

表 7.1.8 各ケースにおける対象物質毎の地上空気吸入による人の健康リスク

ケース	地点	発がんリスク		ハザード比								
		ベンゼン	ベンゾ(a) ピレン	シアン 化合物	水銀	芳香族炭化水素画分						
						>EC5-EC7	>EC7-EC8	>EC8-EC10	>EC10-EC12	>EC12-EC16	>EC16-EC21	>EC21-EC35
A	AVG	9.2×10^{-4}	5.2×10^{-8}	3.5	0.0016	4.3	0.043	0.13	0.051	0.034	NC	NC
B	N-9	3.4×10^{-4}	4.2×10^{-8}	1.5	0.00055	1.5	0.015	0.041	0.017	0.011	NC	NC
C	K-11	3.8×10^{-4}	1.0×10^{-7}	3.0	0.00065	1.7	0.017	0.048	0.022	0.017	NC	NC
D	L-37-1	1.1×10^{-3}	5.3×10^{-8}	4.2	0.0019	4.9	0.050	0.15	0.059	0.040	NC	NC
E	L-37-2	1.3×10^{-3}	4.5×10^{-8}	3.7	0.0023	6.1	0.064	0.22	0.064	0.038	NC	NC
F	C-26-C7	2.2×10^{-3}	2.9×10^{-8}	7.9	0.0039	10	0.11	0.39	0.011	0.068	NC	NC
G	F-22	9.2×10^{-4}	5.5×10^{-8}	3.6	0.0016	4.2	0.042	0.12	0.051	0.035	NC	NC

注) NC : 計算なし (Not calculated)

表 7.1.9 各ケースにおける対象物質毎の目標地下水中濃度

ケース	地点	発がんリスク		目標地下水中濃度 $RBSL_{gw}$ (mg/L)								
		ベンゼン	ベンゾ(a) ピレン	シアン 化合物	水銀	芳香族炭化水素画分						
						>EC5-EC7	>EC7-EC8	>EC8-EC10	>EC10-EC12	>EC12-EC16	>EC16-EC21	>EC21-EC35
A	AVG	1.1	>0.0016	3.7	0.37	24	>520	>65	>25	>5.8	NC	NC
B	N-9	3.1	>0.0016	8.8	1.1	68	>520	>65	>25	>5.8	NC	NC
C	K-11	2.7	>0.0016	4.3	0.92	58	>520	>65	>25	>5.8	NC	NC
D	L-37-1	0.93	>0.0016	3.1	0.32	2	>520	>65	>25	>5.8	NC	NC
E	L-37-2	0.79	>0.0016	3.6	0.26	17	490	>65	>25	>5.8	NC	NC
F	C-26-C7	0.45	>0.0016	1.6	0.15	9.5	280	>65	>25	>5.8	NC	NC
G	F-22	1.1	>0.0016	3.6	0.38	24	>520	>65	>25	>5.8	NC	NC
実測最高濃度		100	0.00045	13	0.0006	100	31	14	<10	<10	<10	<10

注 1) NC : 計算なし (Not calculated)

注 2) 不等号 (>) は $RBSL_{gw}$ が水溶解度よりも大きいことを示す (水溶液である限りリスクは許容範囲内)

7.2 シアン化合物の揮発に係る室内試験による評価

7.2.1 検討目的

本調査は、地下水管理が行われた際に地下水から揮発したシアン化合物がシアン化水素ガスとして隙間や亀裂から建物内に侵入して人の健康や生鮮食料品に影響を与えることが懸念されていることから、地下水中に含まれるシアン化合物および遊離シアン（シアン化合物として分析）の濃度を把握するとともに、実際のシアン化水素ガスの発生状況を室内試験により確認することを目的とする。

7.2.2 検討内容

(1) 試料採取・分析実施期間

室内試験用の地下水試料の採取は平成 20 年 5 月 23 日（2 回目は平成 20 年 5 月 29 日）に行い、シアン化水素ガス測定試験は平成 20 年 5 月 27 日～28 日（2 回目は平成 20 年 5 月 29 日）に行った。

(2) シアン化合物の形態分析

地下水中に含まれるシアン化合物濃度および遊離シアン濃度を測定するため、9 地点（5 街区：3 地点、6 街区：4 地点、7 街区：2 地点）で地下水を採水し、水質分析を行った。

調査地点を表 7.2.1 および図 7.2.1 に示し、分析方法を表 7.2.2 に示す。

表 7.2.1 シアン化合物形態分析の調査地点

街区	調査地点	シアン化合物 (mg/L)	試料採取日
5 街区	J37-4	0.3	平成 19 年 8 月 10 日
	K35-3	0.6	平成 19 年 8 月 14 日
	N39-8	0.4	平成 19 年 8 月 14 日
6 街区	C11-5	1.3	平成 19 年 9 月 8 日
	D11-6	13	平成 20 年 2 月 26 日
	D12-5	8.0	平成 19 年 8 月 9 日
	E26-4	2.2	平成 19 年 8 月 27 日
7 街区	L6-5	0.7	平成 19 年 8 月 16 日
	J7-5	0.2	平成 19 年 8 月 27 日

注) 濃度値および試料採取日は、追加調査における地下水質調査および詳細調査（地下水質調査）の結果である。

表 7.2.2 分析方法

項目	分析方法
シアン化合物	JIS K0102 38.1.2 及び 38.3
遊離シアン	JIS K0102 38.1.1.2 及び 38.3

(3) シアン化水素ガス測定試験

新市場予定地内の地下水からの揮発によるシアン化水素ガスの発生状況を確認するため、比較的高濃度のシアン化合物濃度が地下水から検出された7地点(表7.2.3)の地下水試料について、図7.2.2に示す方法でシアン化水素ガスの測定試験を行った。

本試験では、採水時の地下水の状態だけでなく、地下水中の遊離シアンがシアン化水素となりシアン化水素ガスが発生しやすくなると考えられる酸性側の状態についてもシアン化水素ガスの発生状況を把握し、安全側の評価となるようにした。

また、水温についても、地下水温が高くなりシアン化水素ガスの揮発が促進される夏季を想定し、25℃の恒温状態とした。

表7.2.3 シアン化水素ガス測定試験の実施地点

街区	地点	備考
5 街区	J37-4	
	K35-3	
	N39-8	
6 街区	C11-5	2 回実施
	D11-6	2 回実施
	D12-5	2 回実施
	E26-4	

ガラス容器(615mL容)に地下水試料(185mL)を採る。

に塩酸又は水酸化ナトリウムを加え、pHを4,6,8に調整する(2回目は更に細かくpHを設定している)。

恒温水槽(25℃)で6時間ならびに24時間静置する(2回目は6時間のみ)。

静置後にガラス容器のヘッドスペースガスについて、検知管でシアン化水素を測定する。

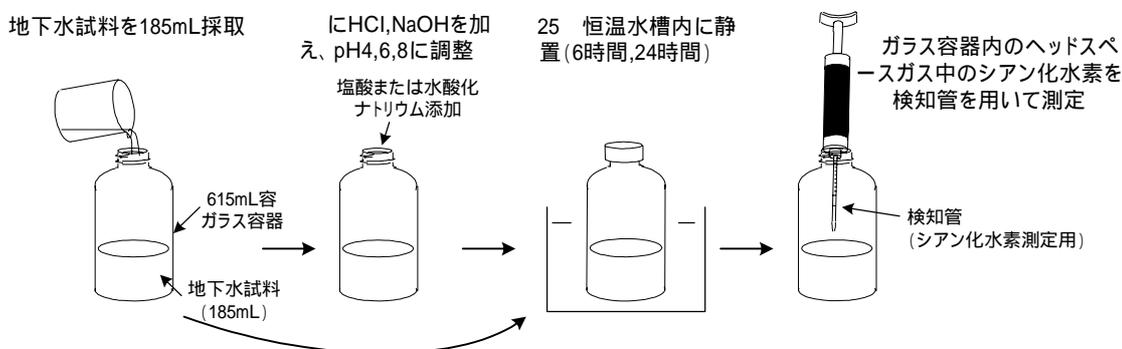


図7.2.2 シアン化水素ガス測定試験の手順

7.2.3 検討結果

(1) シアン化合物の形態分析結果

地下水試料のシアン化合物形態分析結果を表 7.2.4 に示す。

シアン化水素ガスの発生源となる遊離シアンが検出されたのは 6 街区の 3 地点 (C11-5、D11-6、D12-5) であり、いずれも濃度は 0.1mg/L であった。5 街区および 7 街区については、いずれの地点も遊離シアンが検出されなかった。これらのことから、新市場予定地内の地下水に含まれる遊離シアンの量は少量であることがわかる。

また、水素イオン濃度 (pH) は 7.7~9.3 と中性~弱アルカリ性であり、地下水中の遊離シアンがシアン化水素となりやすい酸性側の状態ではないことがわかった。

表 7.2.4 シアン化合物の形態分析結果

街区	調査地点	地下水質		
		シアン化合物 (mg/L)	遊離シアン (mg/L)	水素イオン濃度
5 街区	J37-4	不検出	不検出	9.3
	K35-3	不検出	不検出	9.2
	N39-8	0.2	不検出	8.7
6 街区	C11-5	3.6	0.1	7.6
	D11-6	18	0.1	8.4
	D12-5	4.1	0.1	7.4
	E26-4	0.6	不検出	8.1
7 街区	L6-5	0.5	不検出	7.9
	J7-5	0.3	不検出	7.7

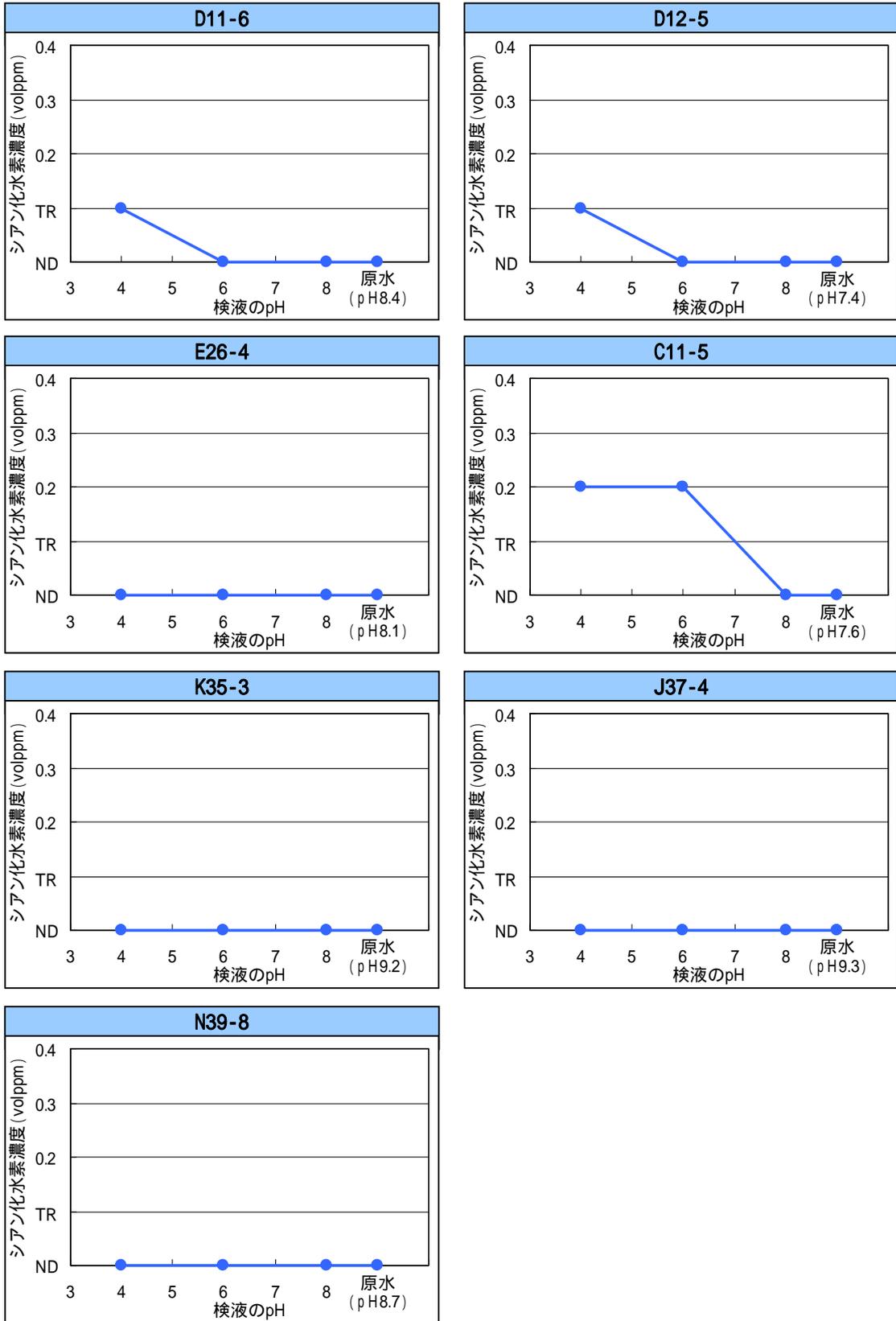
(2) シアン化水素ガス測定試験結果

1) 1 回目測定試験結果

図 7.2.3 に 1 回目の測定試験結果を示す。シアン化水素ガスが測定下限値である 0.2volppm 以上検出されたのは 6 街区の C11-5 の pH4 調整時および pH6 調整時のみであり、6 時間後、24 時間後のいずれもヘッドスペースガスから 0.2volppm 検出された。

それ以外の 6 地点の地下水についてはいずれの pH 条件においてもシアン化水素ガスが検出されなかったが、6 街区の一部の検体 (D11-6、D12-5) で pH4 調整時に検知管の微小な変色が確認された (検知管の測定範囲未満の濃度であり、図 7.2.3 では TR (トレース) と表記)。

シアン化水素ガスが 0.2volppm 確認された C11-5、ならびに検知管に微小な変色が確認された D11-6、D12-5 は、いずれも 6 街区に位置しており、いずれも地下水中に遊離シアンが 0.1mg/L 検出された地点である。



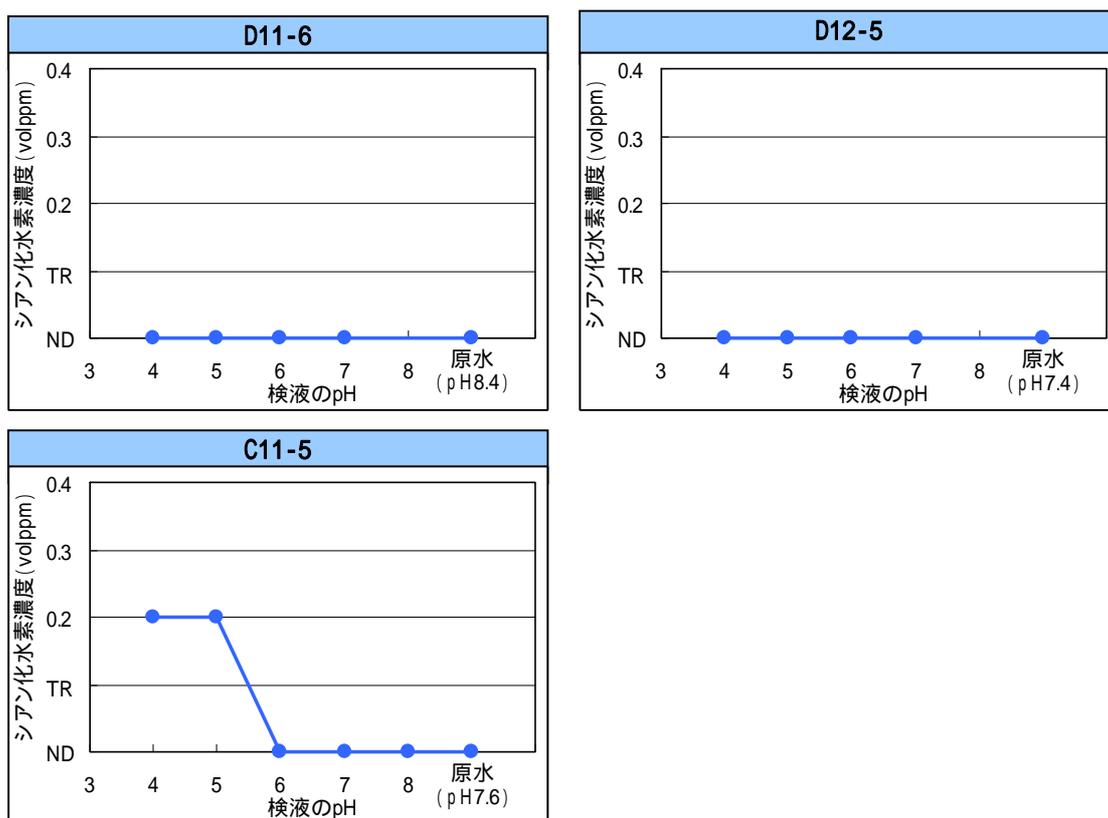
6 時間後と 24 時間後は全く同じ値である。

図 7.2.3 シアン化水素の測定結果

2) 2回目測定試験結果

再確認のために行った2回目試験の結果を図7.2.4に示す。C11-5のpH4調整時およびpH5調整時に6時間後のヘッドスペースガスからシアン化水素が0.2volppm検出された(1回目測定試験で0.2volppmのシアン化水素ガスが確認されたpH6調整時には検出されなかった)

また、1回目測定試験で検知管に微小な着色が確認されたD11-6、D12-5については、いずれのpH条件においてもシアン化水素ガスが検出されなかった。



6時間後の測定値(24時間後は実施していない)

図7.2.4 シアン化水素の測定結果(2回目)

(3) シアン化水素ガス測定試験結果の評価

1) 地下水のpHとシアン化水素ガス濃度の関係

上記(2)の試験結果では、pH未調整(採水時の地下水の状態)およびpH8の状態において、いずれの地下水試料からもヘッドスペースガス中にシアン化水素ガス濃度が検出されなかった(0.2volppm未満)。このことから、現在の地下水の状況が維持されるのであれば、地下水中のシアン化合物からシアン化水素ガスが揮発する可能性はないと考えられる。

一方、pHが低下した酸性側の条件となった場合、pH6では7試料中1試料(C11-5)でシアン化水素ガス0.2volppmが検出され、pH4では7試料中1試料(C11-5)でシアン化水素

ガス 0.2volppm が、2 試料で定量下限値(0.2volppm)未満のシアン化水素ガスが検出された。

2) 地下水中シアン化合物とシアン化水素ガス濃度の関係

pH4 および pH6 の条件において 0.2volppm のシアン化水素ガスの揮発が確認された C11-5 (地下水中のシアン化合物濃度 3.6mg/L、遊離シアン濃度 0.1mg/L) について、地下水中シアン化合物濃度とシアン化水素ガス濃度の間に成り立つヘンリー定数 (H(-)) を求めてみた結果、

$$H = 6.14 \times 10^{-5}$$

となり、7.1 のリスク評価モデルによる曝露量評価で用いたシアン化合物の H の値 (5.50×10^{-3}) の 1/90 の値となった。

このことから、7.1 で行ったリスク評価モデルによる曝露量評価の結果は、シアン化合物からのシアン化水素ガスの揮発について、シアン化水素ガスが発生しやすい酸性条件となった場合を考えても十分な安全率が確保された評価がなされていると判断される。

[参考]

- ・シアン化合物の H を 5.50×10^{-3} とした 7.1 による曝露量評価の結果は、C11-5 の地下水試料を用いてシアン化水素ガス測定試験を行った場合に 17.9volppm のシアン化水素ガスが検出される状態を想定したことになる。