

第 2 章 基礎情報及び技術解説

※第 2 章で使用了た図表は、引用許諾を取って掲載しています。

これらの図表を引用する場合は、必ず著作権者から引用許諾を取って下さい。

本章には、食品中のアクリルアミドに関する基礎的な情報と、事業者がアクリルアミドの低減対策を行う際に参考となる、「原料の調達」、「製品の企画、設計及び開発」及び「製品の製造、加工又は調理」の各段階で適用が期待されるアクリルアミド低減技術についての解説（その実施例や根拠となる科学的データ、留意点など）を記載した。

なお、食品製造にそのままの条件を適用できないが、低減対策の参考となり得る各種モデル試験のデータなどについても記載した。

1. 基礎情報

1.1. アクリルアミドについて

アクリルアミドは、アクリル酸を母体化合物としたアミドの一種であり（図1）、「毒物及び劇物取扱法」で劇物に指定されている。モノマー（1分子）のアクリルアミドは水に溶けやすく、ヒトや動物に対して強い毒性がある。

一方、複数のアクリルアミドモノマーが重合して（つながって）できるポリアクリルアミドは水に溶けにくく、毒性が弱い。ポリアクリルアミドは、合成樹脂の一種として、紙力増強剤、排水処理剤、土壌凝固剤、漏水防止剤、化粧品（シェービングジェルや整髪剤）など工業用途に広く用いられている。



図1 アクリルアミドとアクリル酸の構造

1.2. アクリルアミドの食品からの発見の経緯

1990年代後半、スウェーデンのトンネル工事で、ポリアクリルアミドを主成分とする漏水防止剤を大量に使用したところ、工事現場の周辺で、淡水魚が死亡したり、家畜が麻痺症状を示したりするなどの被害が発生した。さらに、トンネル工事作業員や周辺住民の健康状態に関する調査の結果、作業員にも末梢神経の障害が生じていた。その後の調査により、ポリアクリルアミドを主成分とする漏水防止剤に不純物として含まれていたモノマーのアクリルアミドが原因であることが分かった。

ところが、トンネル工事とは直接関係のない作業員や汚染地域外の住民の血液からもモノマーのアクリルアミドが検出され、アクリルアミドの暴露経路が、トンネル工事による環境汚染に由来するものだけでない可能性が示唆された。その後の調査により、食品からの暴露の可能性が示唆されたこと、また、タバコの煙からもアクリルアミドが検出されたことから、食品を加熱することによってアクリルアミドが生成するとの仮説が立てられた。こうして、食品中のア

クリルアミドに関する研究が開始された。

2002 年 4 月、スウェーデン食品安全庁とストックホルム大学が、炒めたり、焼いたり、揚げたりしたばれいしょや穀類の加工品に、ヒトに対して発がん性が疑われているアクリルアミドが含まれることを発表した (NFA, 2002)。このことをきっかけとして、世界中の関係者が、食品中のアクリルアミドを食品安全上の新たな問題として注目し始めた。

1.3. 食品中のアクリルアミドの生成機序

食品中のアクリルアミドの主要な生成経路は、アミノ酸の一種である遊離アスパラギンと還元糖に分類されているぶどう糖や果糖によるアミノ・カルボニル反応であることが報告されている (Mottram, et al., 2002; Stadler, et al., 2002)。

実験的にアクリルアミドの炭素鎖は主としてアスパラギン由来であることが確認されている。また、近年の研究でアスパラギナーゼ (本章 5.2 参照) による食品中のアクリルアミドの低減効果が極めて大きいことが示されていることから、食品中のアクリルアミドの生成はアスパラギンからの経路が主なものであると考えられている。

還元糖以外にカルボニル化合物も、アスパラギンとのアミノ・カルボニル反応に関与しており、アスパラギンからアクリルアミドが生成する経路は複数存在すると考えられている (Jin, et al., 2013)。3-アミノプロパンアミド (3-APA) をアクリルアミド生成反応の主要な中間体であるとする説もあるが (Granvogl, et al., 2004; Granvogl, et al., 2006; Zyzak, et al., 2003)、3-APA を経由する経路がどの程度寄与するのかよくわかっていない。

これまでに報告されている食品中のアクリルアミドの代表的な生成経路を図 2 に示した。

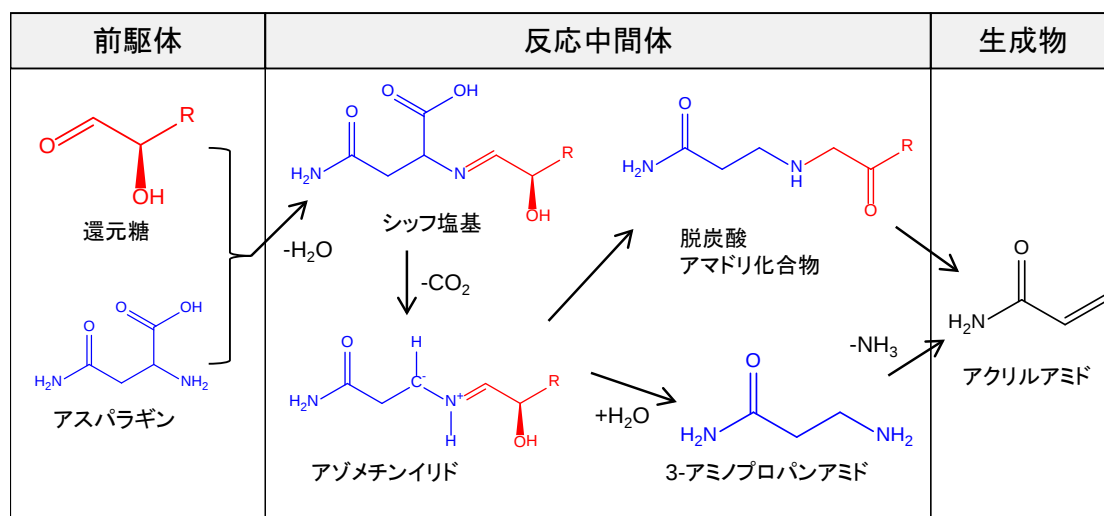


図 2 食品中のアクリルアミドの主な生成経路

なお、アミノ・カルボニル反応以外の化学反応によってもアクリルアミドが生成する可能性が報告されている。例えば、食品に含まれる脂質が分解して生成するアクロレインの酸化による経路、アスパラギンから生成したアクリル酸がアンモニアと反応して生成する経路、セリンやシステインなどのアミノ酸から生成した乳酸がアンモニアと反応して生成する経路などが報告されている。

1.4. アクリルアミドの毒性

第 64 回及び第 72 回の FAO/WHO 合同食品添加物専門家会合（JECFA）の評価書（JECFA, 2006; JECFA, 2011）に基づいて、アクリルアミドの毒性を概説する。

アクリルアミドの体内動態

経口摂取したアクリルアミドは、腸管でほとんどが吸収され、全身の組織に分布する。母乳や胎児へ移行することも観察されている。

吸収されたアクリルアミドの一部が、代謝酵素（CYP2E1）の働きによって、より反応性の高いエポキシド構造（図 3 中の丸囲みの構造）を持つグリシドアミド（図 3）へと変化する。ヒトの場合、体内でアクリルアミドがグリシドアミドに代謝される割合は個人差が大きいことが知られている。

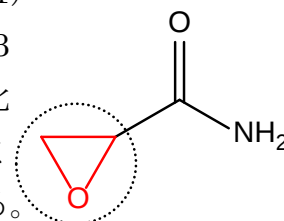


図 3 グリシドアミド

グリシドアミドはさらにグリセルアミド又はグルタチオン抱合体へと代謝されて尿中へと排泄されるか、もしくはヘモグロビンや DNA と反応して付加体を形成する。アクリルアミドの大部分はグルタチオン抱合によりメルカプツール酸及びそのスルホキシドへと代謝されて尿中へ排泄され（図 4）、一部はヘモグロビンと反応して付加体を形成する。

発がん性

国際がん研究機関（IARC）は、発がん性に関する証拠の強さから、アクリルアミドを「ヒトにおそらく発がん性がある物質（グループ 2A）」に分類している（IARC, 1994）。

アクリルアミドを含む飲水を 2 年間げっ歯類（ラットやマウス）に投与したところ、多くの組織、器官に腫瘍が発生した（表 1）（NTP, 2010）。これらの腫瘍形成は、一部を除き、グリシドアミドを用いた同様の試験でも観察され、腫瘍の発生率はアクリルアミドと同程度か、それより高かった。このことから、アクリルアミドの代謝物であるグリシドアミドが、がんの原因物質であることが強く示唆された。

表 1 飲水中のアクリルアミドが試験動物に与える影響

試験動物	飲水中のアクリルアミドによる影響
ラット	（雌雄）甲状腺、乳腺に腫瘍を形成
	（雄）精巢中皮の腫瘍、心臓のシュワン腫、脾臓腫瘍の形成
マウス	肺、ハーダー腺、前胃、乳房、卵巣に腫瘍を形成

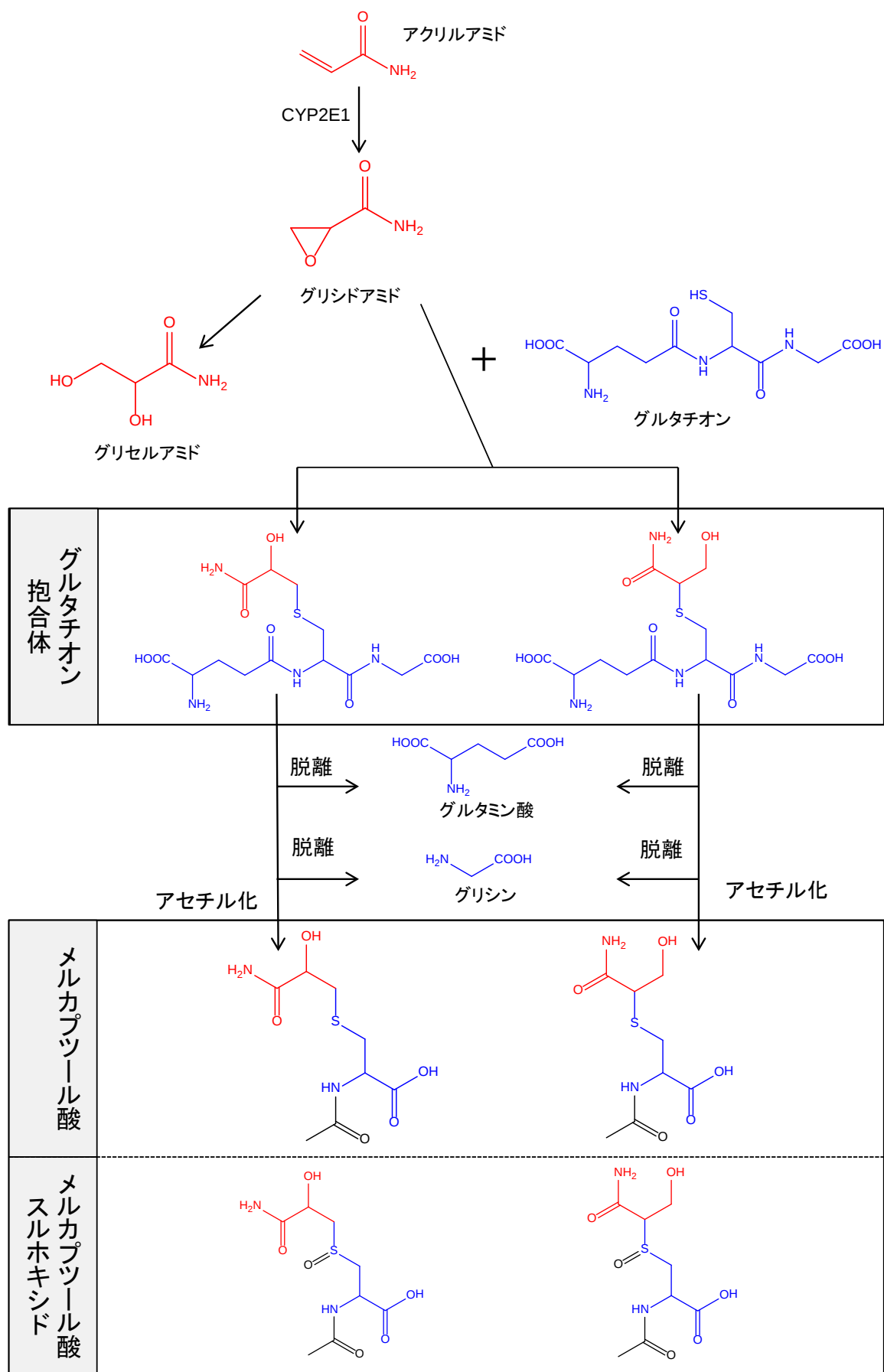


図 4 生体内のアクリルアミドの代謝経路

遺伝毒性

多くの遺伝毒性試験において、アクリルアミド及びグリシドアミドに染色体異常誘発性及び変異原性があることが確認されている。

神経毒性

アクリルアミドの毒性として、発がん毒性以外に重要なのは神経毒性であり、多くの動物試験によって確認されている。これまでに報告されている最も低い無毒性量 (NOAEL) は、0.2 mg/kg 体重/日である (アクリルアミドを含む飲料水を 90 日間ラットに投与した試験において、電子顕微鏡による観察で神経組織の形態変化が見られない最大投与量から決定された。)。

その他の毒性

上記の毒性の他に、生殖毒性と発達毒性が観察されている。ただし、これらの毒性に関して報告されている NOAEL は、いずれも神経毒性の NOAEL である 0.2 mg/kg 体重/日より大きい。

ヒトの疫学調査及び暴露事例

ヒトの職業暴露や事故の事例から、アクリルアミドを大量に吸入又は経皮吸収すると、中枢神経及び末梢神経に障害 (筋力低下、感覚異常、知覚麻痺、歩行異常など) が起きることが分かっている。

一方、職業暴露や経口暴露とヒトの発がんの関連については、疫学調査などでも一貫性のある証拠は得られていない。アクリルアミドを含む食品の摂取とある種の発がんに関係があることを示唆するいくつかの報告はあるが、JECFA は、疫学調査に用いられる食物頻度アンケートに基づく暴露量推定には限界があり、さらなる検証が必要としている。

用量-反応分析

JECFA は、各器官において腫瘍の発生率が 10%増加する投与量 (BMD₁₀) とその 95%信頼下限値 (BMDL₁₀) を算出し、もっとも低い BMDL₁₀ である雄マウスのハーダー腺における腫瘍形成の 0.18 mg/kg 体重/日と、雌ラットの乳腺繊維腺腫形成の 0.31 mg/kg 体重/日を、発がん性の指標値として使用するのが適当とした。ハーダー腺はヒトには存在しないが、アクリルアミドによって、げっ歯類 (ラットやマウス) でハーダー腺以外にも多くの組織・器官で腫瘍が形成されたことを考慮した。

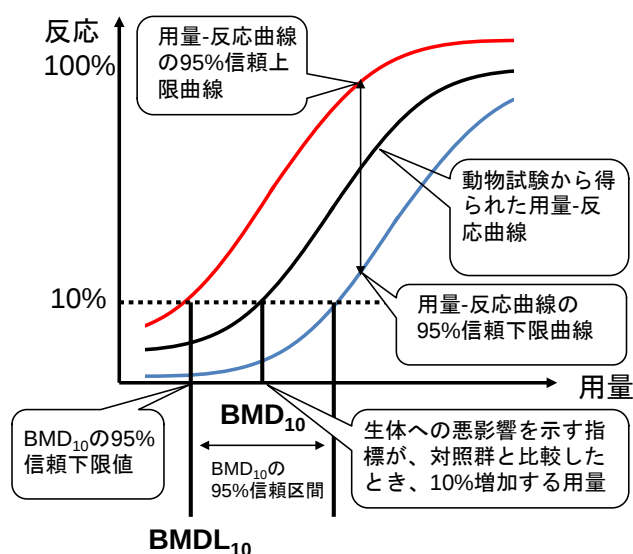
また、ラットの神経組織の形態変化が起きない最大の濃度である 0.2 mg/kg 体重/日を、発がん性以外の毒性に関する最も低い NOAEL とした。

(参考) BMD₁₀ と BMDL₁₀

動物を用いた毒性試験では、比較のために、化学物質を投与する動物群（試験群）と、化学物質を投与しないが試験群と同様の条件で飼育する動物群（対象群）を設定する。この時、投与する化学物質の用量を変えた複数の群を用意する。これらの動物群を観察することで、化学物質の用量と生体影響の関係を調べることができる。

BMD (benchmark dose : ベンチマーク用量) とは、化学物質の用量と生体影響の関係から算出した、毒性評価上の用量である。対照群と比較したとき、生体への悪影響を示す指標（発がん試験の場合は腫瘍の発生率や発生数）が、X%増加する化学物質の用量を BMD_x と表す。生体への悪影響を示す指標の増加率には、10%、5%、1%などを用い、増加率が低いほど BMD は小さくなる。発がん性の評価では、通常、腫瘍の発生率が 10%増加する用量である BMD₁₀ を用いる。BMD は、無毒性量 (NOAEL) とは異なり、閾値（ある用量までは毒性を示さない化学物質が、毒性を示しはじめる用量）がなくても設定できることから、遺伝毒性発がん物質のように、閾値がないと考えられている化学物質の評価の際、特に有効である。

実際には、試験に用いることができる動物数は限られており、また、結果にはばらつきがあることから、BMD の真の値を知ることは困難である。そこで、BMD の真の値を 95%の確率で含む範囲（95%信頼区間）を統計学的に推定し、BMD の 95%信頼下限値 (benchmark dose lower confidence limit : BMDL) を使用する。発がん性のリスク評価では、通常、BMDL₁₀ を用いる（概念図参照）。



1.5. 食品中のアクリルアミドによる健康リスク

ここでは第 72 回 JECFA のリスク評価の結果と勧告を紹介する (JECFA, 2011)。

2003 年以降、アクリルアミド濃度が高かった食品などで濃度が低減してきていることが報告されているが、一般的な消費者の暴露量に変化はなく、推定したアクリルアミドの経口暴露量は、2005 年の第 64 回会合のときと同じく、一般的な消費者で 0.001 mg/kg 体重/日、アクリルアミド暴露量の多い消費者で 0.004 mg/kg 体重/日であった。

JECFA は、この暴露評価と毒性評価（「1.4. アクリルアミドの毒性」参照）の結果から、暴露マージン (MoE) を指標として健康リスクの程度を推定した。その概要と結論を表 2 に示した。

さらに、JECFA は、食事からの暴露に大きく寄与する食品に含まれるアクリルアミドを低減する方法のさらなる開発及び実施を勧告した。

なお、国内では、現在、食品安全委員会が加熱時に生じるアクリルアミドの食品健康影響評価（リスク評価）を実施している。

表 2 第 72 回 JECFA のリスク評価結果

影響	NOAEL 又は BMDL ₁₀ (mg/kg 体重/日)	暴露マージン (MoE)		結論/コメント
		平均摂取	高摂取	
ラットにおける神経組織の形態変化	0.2 (NOAEL)	200	50	平均摂取量では神経への影響はないと考えられるが、摂取量が多い場合には神経に形態変化が生じる可能性は無視できない。
雌ラットにおける乳腺腫	0.31 (BMDL ₁₀)	310	78	遺伝毒性及び発がん性を有する化合物としては MoE が小さく、健康への悪影響が生じる可能性は無視できない。
雄マウスにおけるハダ腺腫	0.18 (BMDL ₁₀)	180	45	

(参考) 暴露マージン (Margin of Exposure: MoE)

暴露マージンは、ある化学物質について、動物試験などに基づく用量-反応分析の結果得られた NOAEL や BMDL₁₀ などの指標値と、ヒトの暴露量の比であり、以下の式により表される。

$$\text{暴露マージン (MoE)} = \frac{\text{NOAEL や BMDL}}{\text{食品からの体重 1 kg 当たりの暴露量}}$$

暴露量が大きいほど、または、毒性が強く NOAEL や BMDL が小さいほど、MoE の値は小さくなり、健康影響が生じる可能性が高いことを示す。一般に、遺伝毒性発がん性の場合は 10,000 未満、それ以外の毒性（例：神経毒性）の場合は 100 未満であると、健康への悪影響が生じる可能性が無視できないとして、低減対策を実施する必要性が高いと解釈される。

1.6. 各国のアクリルアミドの低減のための取組

日本を含むほとんどの国や地域では、食品のアクリルアミド濃度を規制していないが、食品事業者は政府と連携して、自主的に濃度を低減する取組を行っている。

コーデックス委員会は、フードチェーンアプローチの観点から、行政、食品事業者などの関係者向けの手引きとして「食品中のアクリルアミド低減に関する実施規範(CAC/RCP-67)」を2009年に採択し、加盟国がこの規範に従って食品中のアクリルアミド低減に取り組むことを勧告している (Codex, 2009)。

欧州委員会 (EC) は、欧州食料飲料産業連盟 (FoodDrinkEurope) が EC や各国政府の協力の下で作成した Acrylamide Toolbox に基づいて低減対策を行っている。2012 年には、EC が主要品目に指標値 (indicative value) を導入し (2013 年に改定) (表 3)、現在、事業者による自主的な低減対策の検証が進められている (EC, 2011; FoodDrinkEurope, 2011)。この指標値は、EU 加盟各国政府が事業者を調査する際の目安としてのみ活用されているもので、この指標値を超える濃度の製品があった場合には、事業者が適切な措置をとっているかどうかを各国政府が確認することを EC は推奨している。

米国食品医薬品局 (US FDA) は、食品中のアクリルアミドを低減するための事業者向けガイドラインのドラフトを公表し、パブリックコメントを募集している (2013 年 11 月現在) (US FDA, 2013)。

日本では、一部の食品業界や事業者が自主的にアクリルアミドの低減対策を行っている。農林水産省は、主要な食品について定期的に含有実態調査を実施し、アクリルアミドへの暴露の原因として無視できない様々な食品について、低減の取組を推進している。

(参考) 事業者が自主的に指標値を設定する場合

事業者が自主的に製品のアクリルアミド濃度について管理指標値や低減目標値を設定する場合は、それらの指標値や目標値は、実態調査のデータなどの科学的な根拠に基づいて設定することが望ましい。例えば、実態調査のデータを統計解析し、90 パーセンタイル値や 95 パーセンタイル値を参考に設定する方法がある。これらの指標値や目標値は、直近の実態調査の結果や技術開発の状況に応じて見直す。

表 3 食品中のアクリルアミド指標値 (EC, 2013)

品目	指標値(μg/kg)
調理済みフレンチフライポテト	600
ポテトチップス	1000
ばれいしょを主原料とするクラッカー	1000
ソフトブレッド	
(a) 小麦を主原料とするソフトブレッド	80
(b) 小麦を主原料とするソフトブレッド以外のソフトブレッド	150
朝食用シリアル（ポリッジ ⁶ を除く）	
ふすま製品、全粒穀類、膨化穀粒（膨化処理の表示があるものに限る）	400
小麦及びライ麦を主原料とする製品	300
とうもろこし、エン麦、スペルト小麦、大麦及び米を主原料とする製品	200
ビスケット、ウェハース	500
クラッカー（ばれいしょを主原料とするクラッカーを除く）	500
クリスプブレッド	450
ジンジャーブレッド	1000
本カテゴリーの他の製品と同様な製品	500
焙煎コーヒー	450
インスタント（ソリュブル）コーヒー	900
代用コーヒー	
(a) 穀類を主原料とする代用コーヒー	2000
(b) その他の代用コーヒー	4000
ベビーフード（穀類加工品を除く）	
(a) プルーンを含まないもの	50
(b) プルーンを含むもの	80
乳幼児用ビスケット及びラスク	200
乳幼児用穀類加工品（ビスケット及びラスクを除く）	50

※この指標値は、EU 各国における食品中のアクリルアミドの含有実態等に基づき設定されたものであり、日本国内で流通する食品の実態を示したものではない。また、農林水産省が目標値を設定したり、事業者目標値の設定を求めたりするものではない（農林水産省注釈）。

⁶ ポリッジとは、オートミールなどの穀類を牛乳や水などで煮た粥のこと。

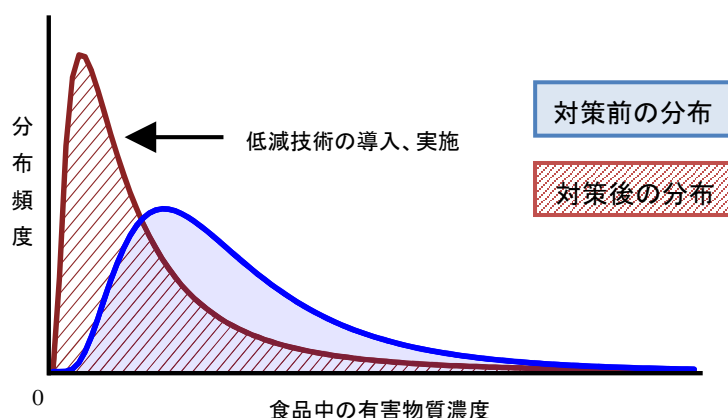
(参考) 国際的に合意された考え方

食品の製造、加工又は調理の工程で意図しないにもかかわらず生成する有害物質の濃度を低くするためには、農場から食卓までの食品供給工程の必要な段階において、次の対策を講じ、有害物質の生成を防止、抑制することが有効である。

- 有害物質に変化する前駆体を減らす。
- 有害物質の生成をできるだけ低く抑える。
- 生成した有害物質を分解、除去する。

これらの低減対策の実施によって、食品に含まれる有害物質の濃度分布が従来よりも低濃度側に移行すると、有害物質の経口暴露量も低減する。すなわち、有害物質に起因する健康リスクの低下が期待できる（下図参照）。

それゆえ、食品に意図しないにもかかわらず含まれる有害物質については、低減のためのガイドラインや指針の策定とその実施が極めて重要であると国際的に認識されており、コーデックス委員会でも食品に含まれている濃度を可能な範囲でできるだけ低くするため、実施規範の作成が優先的に行われている。



低減技術の導入と有害物質濃度分布の関係（模式図）（農林水産省作成）

食品中にいったん生成した有害物質を化学的に分解・除去する方法は、それによってその有害物質やその他の食品成分がより有害なものに変化する可能性を科学的に否定できない限り、採用すべきではない。

なお、食品中の有害物質の最大基準値や指標値（指標値は、法令に基づかないものであり、政府だけでなく事業者が自主的に設定することができる。）は、低減対策の実施によってどの水準まで濃度を下げる必要があるのかを、事業者が知るための指標として有効である。しかし、最大基準値や指標値を設定しても、低減対策を実施しなければ食品自体の安全性が高まることはない。

1.7. 食品中のアクリルアミドの分析

食品を分析する場合、分析結果が科学的に信頼できることが重要である。このためには、①いつ、どこで、誰が分析しても同様の分析結果が得られることが客観的・科学的に検証（妥当性確認）された分析法を使用すること、②組織管理、分析者の教育、測定手順などの文書化、内部での分析の品質管理などのマネジメント体制が整っていることが必要である。

外部の分析機関に分析を発注する場合、国際的に通用する品質の分析結果を得るためには、アクリルアミドの分析について ISO/IEC 17025 の認定を取得しているか又はそれと同等の分析技術を有していることを科学的に証明できる分析機関を選ぶ必要がある。

事業者が自ら分析する場合、マネジメント体制の構築、分析法の妥当性確認、測定値の検証（認証標準物質の定期的な使用／又は二次標準物質を用いた品質管理、技能試験プログラムへの参加、反復分析の実施等）、記録・データの適切な管理など ISO/IEC 17025 の要求事項にできるだけ従う。

対象食品は何か、どの程度の濃度を分析するのかなどによって適した分析法は異なる。代表的なアクリルアミドの分析法の概要を表 4 に示した。

表 4 代表的なアクリルアミドの分析法とその特徴

	GC/MS 法	LC/MS/MS 法	ELISA 法 ^(注 3)
初期導入コスト	800 万～2 千万円程度	2 千万～5 千万円程度	100 万円程度
分析単価	20,000～30,000 円 ^(注 1)	20,000～30,000 円 ^(注 1)	3000 円程度
測定時間	1 日	1 日	6 時間程度
測定濃度範囲	約 0.02 mg/kg 以上 ^(注 2)	約 0.01 mg/kg 以上 ^(注 2)	0.18 mg/kg 以上
適用食品	食品全般	食品全般	濃度の低い食品以外

(注 1) 分析機関に発注した場合のおよその単価（分析点数、分析機関により異なる。）

(注 2) 食品の種類によっても異なる。

(注 3) 市販されている ELISA キットのカタログ値に基づく。

ある食品のアクリルアミド濃度を知るためには、どのくらいの量の調査試料を、いつ、どのように採取するかということも重要である。

一般的に、食品の均質性の違いによって、ロット中の化学物質の濃度を知るために必要な抜取点数、試料量は異なる。不均質な食品は、出来るだけ抜取点数・量を増やし、良く均一化したものを分析用試料とする必要がある。

食品中のアクリルアミドの分析に関連する情報を入手する際は、農林水産省のウェブサイト⁷も参照されたい。

⁷ 食品中のアクリルアミド分析について（農林水産省）

http://www.maff.go.jp/syoutan/seisaku/acryl_amide/a_syosai/about/bunseki.html

2. 原料農産物の調達段階での検討事項

2.1. 調達

- ・ 可能であれば、アスパラギン及び/又は還元糖濃度が低い原料農産物を調達する。
- ・ 穀類の場合、加工に適した穀類・穀粉を調達する。また、必要に応じて、アスパラギン濃度の低い穀類（種類）・穀粉（種類、部位、精白度）を調達することが可能か検討する。

同じ種類の農産物でも、品種や生産地、生産年、収穫後の貯蔵条件、貯蔵期間によって、天然に含まれる遊離アスパラギンや還元糖（以下「前駆体」という。）の濃度が大きく異なる。原料農産物に含まれる前駆体の濃度が低ければ、加熱によって生成するアクリルアミドの量は少なくなる。そのため、前駆体濃度の低い原料農産物（一次加工品を含む。）の調達は、アクリルアミドを低減するための有効な手段の一つである。ただし、現時点で適切な品種がない場合や、供給量が少なく調達が困難な場合は、製造、加工又は調理の工程で、アクリルアミドの生成を抑制するための対策を行う。

前駆体濃度が低い原料農産物を用いると、製造、加工又は調理の工程を大きく変更しなくても、アクリルアミドを低減することができる可能性がある。したがって、国や地方自治体、育種者、種苗販売者、生産者などが連携し、新たな品種の開発や、原料農産物の安定供給のための産地育成などを継続することが重要である。

なお、ばれいしょ加工品（フライドポテト、ポテトチップス）中のアクリルアミド濃度と原料ばれいしょ中の還元糖濃度との間には高い正の相関があるが（図 5）、遊離アスパラギン濃度との間には相関が認められない（図 6）（Amrein, et al., 2007; De Wilde, et al., 2006; Ohara-Takada, et al., 2005）。一方、穀類製品のアクリルアミド濃度と原料穀類の遊離アスパラギン濃度との間には正の相関があるが、還元糖濃度との間には相関が認められない（図 7）（Hamlet, et al., 2008; Weber, et al., 2008）。

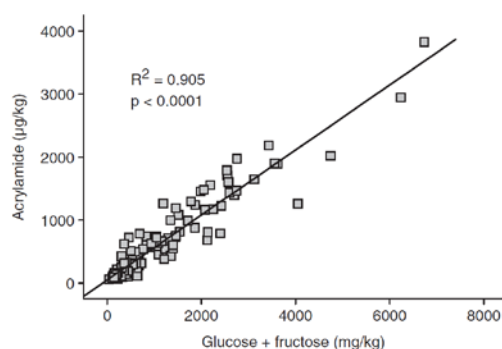


図 5 原料ばれいしょの還元糖（ぶどう糖、果糖）濃度とフライドポテト（120℃で 40 分間加熱）の アクリルアミド濃度の関係（Amrein, et al., 2007）

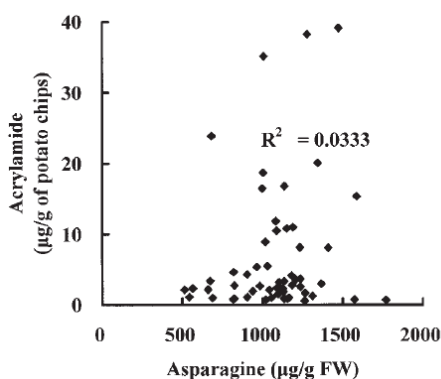


図 6 原料ばれいしょ（トヨシロ）の遊離アスパラギン濃度とポテトチップスのアクリルアミド濃度の関係（Ohara-Takada, et al., 2005）

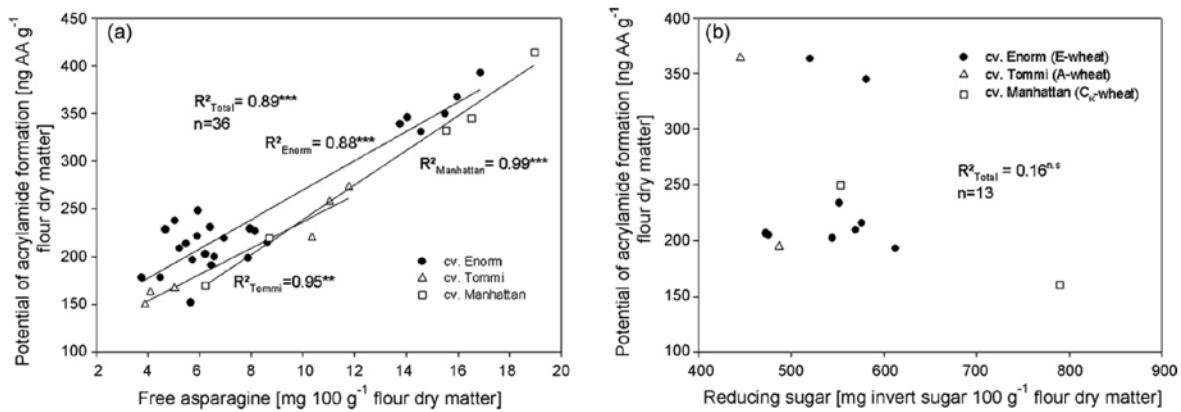


図 7 (a) 原料小麦の遊離アスパラギン濃度と生成する可能性があるアクリルアミドの濃度の関係、(b) 原料小麦の還元糖濃度と生成する可能性があるアクリルアミドの濃度の関係 (Weber, et al., 2008)

2.2. 貯蔵、保管

- ・ 原料農産物の貯蔵及び保管温度を適切に管理する。

植物に含まれるアミノ酸には、遊離アミノ酸として存在するものの他に、ペプチドやたんぱく質を構成するものがあり、酵素によってペプチドやたんぱく質が分解されると遊離アミノ酸の量が増加する。また、酵素などによって、植物に含まれているでん粉はぶどう糖に、ショ糖はぶどう糖と果糖にそれぞれ分解される。したがって、収穫後の取扱いによって、農産物に天然に含まれる遊離アスパラギンや還元糖濃度が増加する可能性があるため、原料農産物を適切な条件で保管、貯蔵する必要がある。

貯蔵施設内での低温貯蔵（雪中貯蔵や氷室貯蔵を含む。）や冷蔵庫内での低温保管は、農産物の発芽や減耗を抑制する効果や低温糖化によってばれいしょの甘みを増す効果が期待できるため、しばしば意図的に行われている。このような低温で貯蔵、保管されたばれいしょは、蒸したり、茹でたりする場合には問題とはならないが、揚げたり、焼いたりする場合には低温貯蔵による還元糖の増加によってアミノ・カルボニル反応が進み、アクリルアミドの生成量が増えるほか、焦げによって商品価値が低下する可能性がある。

そのため、ばれいしょなど低温糖化の生じやすい加工用農産物を貯蔵、保管する際（生産者団体や倉庫業者に委託する場合を含む。）は、還元糖濃度の増加を抑制するよう、低温糖化が生じない温度（例：ばれいしょの場合、8℃以上）に管理することが有効である（図 8）（Matsuura-Endo, et al., 2006）。

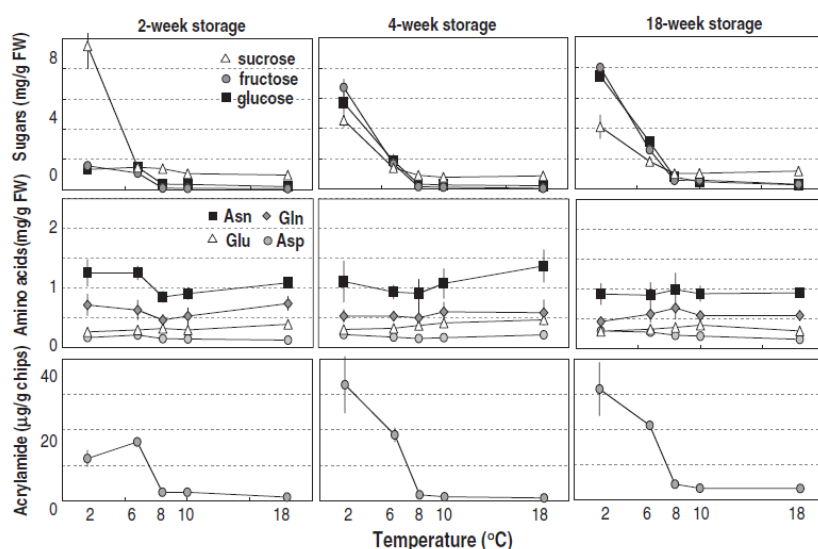


図 8 ばれいしょ（トヨシロ）の貯蔵温度と、貯蔵期間、糖濃度、遊離アミノ酸濃度及びチップス中のアクリルアミド濃度の関係（Matsuura-Endo, et al., 2006）

2.3. 前駆体濃度の把握

- ・ 必要に応じて、原料農産物の調達、貯蔵、受入の必要な段階で前駆体濃度を測定する。または、前駆体濃度の代替指標を測定する。

原料農産物の品質に応じて、原料調達の是非を判断したり、食品の製造、加工又は調理工程における対策の必要性を検討したりするため、原料の調達、貯蔵、受入などの必要な段階で、ロットごとに前駆体濃度を把握することが重要である。これは、生鮮原料に限らず、一次加工品（乾燥、冷蔵、冷凍などの処理をしたもの）を原料とする場合も同様である。また、主原料と同様に、副原料も、必要な段階で前駆体濃度を把握することが望ましい。

前駆体の濃度が著しく高い場合には、食品の製造、加工又は調理工程の必要な段階において、アクリルアミドの生成を抑制するための対策をとる必要がある。可能であれば、原料農産物の用途変更も選択肢の一つとなる。

食品の遊離アスパラギン濃度は、ガスクロマトグラフ（GC/FID）や高速液体クロマトグラフ（HPLC/UV）、高速液体クロマトグラフタンデム質量分析計（HPLC/MS/MS）、アミノ酸自動分析計を用いて測定できる（Mustafa, et al., 2006; Benedito de Barber, et al.）。

食品のぶどう糖、果糖の濃度は、高速液体クロマトグラフ（HPLC）を用いて測定できる【厚生省, 1999】。食品中の還元糖の総量は、ソモギー・ネルソン法、ベルトラン法、レイン・エイノン法などで測定できる【菅原, ほか, 2000; 小原, ほか, 1982】。

また、これらの前駆体濃度を直接測定する方法以外に、原料農産物中の前駆体濃度との間に高い相関がある指標があれば、それを前駆体濃度の代わりとして用いることができる。

例えば、加熱後の農産物の着色の程度と前駆体濃度との間に高い相関がある場合、アグトロンカラーメーターや色差計で測定できる指標（アグトロン値やL*値又はa*値）を用いて前駆体濃度の水準を推定することができる。

ただし、ある原料農産物で適用可能な代替指標が報告されていたとしても、自らが取り扱う原料農産物にその代替指標が適用可能か確認する必要がある。

2.4. 前駆体濃度の調整

- ・ 必要に応じて、原料ばれいしょのリコンディショニングを行う。

加工用の原料ばれいしょについては、低温貯蔵による糖化で増加した還元糖によって加熱時に焦げが発生するのを防止するため、貯蔵終了後、出庫時に15℃前後で2週間程度保管し、還元糖の濃度を低くする対策（リコンディショニング）が一般的に行われている（図9）（Hironaka, et al., 2003）。

低温糖化によって原料ばれいしょの還元糖濃度が増加した場合、リコンディショニングを行って還元糖濃度を低くすることで、アクリルアミドの生成量も少なくすることができる。リコンディショニングには特別な装置や設備は必要ないため、原料貯蔵時だけでなく、原料受入後に食品製造事業者が実施することも可能である。

ただし、リコンディショニングはすべての品種に有効ではないこと、リコンディショニングにより萌芽の伸長や減耗が進む可能性があることに留意する必要がある。

リコンディショニング（15℃で10日間）によって、「トヨシロ」に比べて、「きたひめ」と「スノーデン」は揚げ色が薄くなったことが報告されている（図10）[道総研, 2011b]。

なお、同調査では、リコンディショニング前の芽の伸びが5 cm 以上場合には、チップカラー（チップの揚げ色）改善効果が低い傾向であった。また、リコンディシ

ョニングによるチップカラー改善効果は、処理温度を15℃から18℃に上げても顕著な差は認められず、また、処理期間は5～10日で著しく改善し、10日以上ではほとんど変わらなかった。

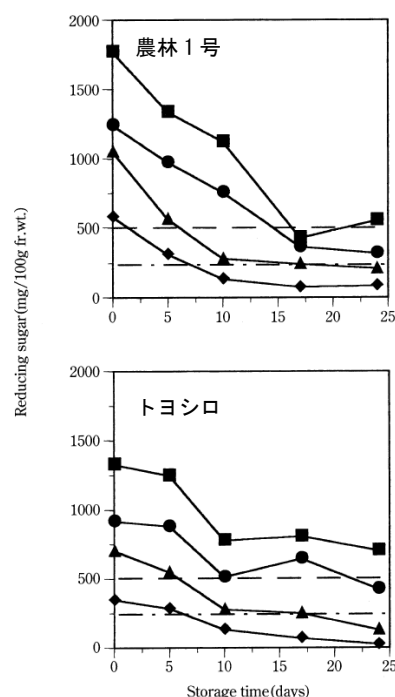


図9 16℃のリコンディショニングによるばれいしょの還元糖濃度の変化（7℃で3ヶ月貯蔵したばれいしょを使用、n=8）
■ストロン部 ●中央ストロン部 ▲中央頂芽側 ◆頂芽部
(Hironaka, et al., 2003)

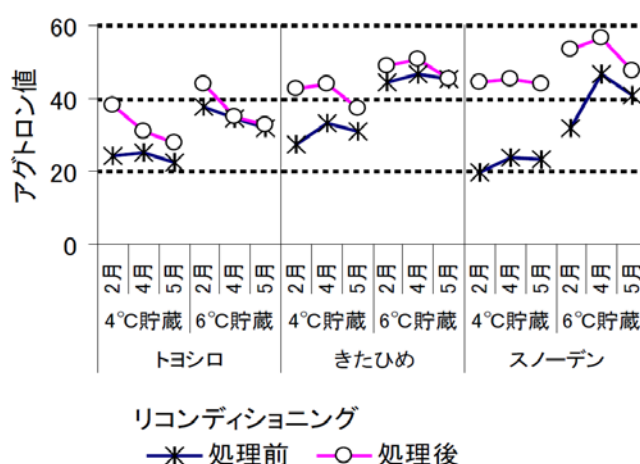


図10 リコンディショニングとチップカラー
[道総研, 2011a]

3. 食品の企画、設計及び開発段階での検討事項

3.1. 原料組成、配合比率の検討①

- ・ 必要に応じて、原料農産物の種類を見直す。

遊離アスパラギンと還元糖の濃度が高い農産物は、加熱によってアクリルアミドが生成しやすいが、種類によって遊離アスパラギンと還元糖の濃度が異なる。

コーデックス委員会の実施規範では、穀類の典型的な遊離アスパラギン濃度は、小麦では 75～2200 mg/kg、エン麦では 50～1400 mg/kg、ライ麦では 319～880 mg/kg、米では 15～25 mg/kg、トウモロコシでは 70～3000 mg/kg の間にあるとされている (Codex, 2009)。このように、同種の穀類の中でも遊離アスパラギン濃度に大きなばらつきがあるが、十分な知見はまだ得られていない。

(参考) 穀類中の遊離アスパラギン

一般的に、ライ麦は小麦よりも遊離アスパラギン濃度が高く、コメは小麦よりも遊離アスパラギン濃度が低い。したがって、複数の穀類原料を使用する製品の場合、ライ麦や小麦の割合を減らし、コメの割合を増やすことで、アクリルアミドの生成量を減らすことができる可能性がある。

また、同じ穀類であっても胚芽や果皮、種皮（いわゆる、ふすま、麦ぬか、米ぬかなど）を含むか否かでアミノ酸濃度が大きく異なり、胚芽、果皮、種皮などを含む全粒粉は、それらを取り除いた穀粉と比較して、遊離アスパラギン濃度が高い。そのため、全粒粉の割合を減らし、精製した穀粉の割合を増やすことで、アクリルアミドの生成量を減らすことができる可能性がある。

ただし、全粒粉、ライ麦粉、エン麦粉などには食物繊維やビタミンなどが通常の小麦粉より多く含まれており、それらの使用割合を大きく減らすと、最終製品の栄養価や風味に影響する。

穀類の遊離アスパラギン (Asn) 濃度

穀類の種類	Asn 濃度(mg/kg)	穀類の種類	Asn 濃度(mg/kg)
全粒小麦粉	347	エン麦胚芽	819
ふるいにかけた小麦粉	88 - 99	大麦粉	315
小麦麦芽	931	玄米粉	36
全粒ライ麦粉	656	米胚芽	282
ライ麦麦芽	1140	精米粉	26
エン麦	298		

出典：食品の遊離アミノ酸含有量表（公益社団法人日本栄養・食糧学会）

小麦粉の遊離アスパラギン濃度 (Horita, et al., 2005)

Amino acid	Variety								Product name
	Ayahikari		Turupikari		Nourin 61		Bandouwase		
	Type of fertilizer application								
	A ^{b)}	B ^{c)}	A	B	A	B	A	B	
L-Aspartic Acid	10.85	13.88	11.84	24.43	9.47	17.38	10.16	10.53	11.22
L-Asparagine	5.24	20.44	4.50	14.52	3.87	17.95	6.05	23.04	4.34
L-Glutamic Acid	5.91	16.99	3.83	7.84	1.89	16.22	3.57	14.88	4.02
L-Alanine	5.08	6.30	3.68	4.00	3.06	4.88	2.89	5.65	2.65
L-Tyrosine	1.16	1.58	0.78	1.47	0.64	1.38	1.01	2.12	1.16
L-Phenylalanine	1.16	1.30	0.92	1.34	0.65	1.27	0.95	1.32	1.06
L-Tryptophan	28.40	9.47	18.21	10.54	8.52	4.66	16.25	3.64	12.95

Figures are mg per 100 g dry weight.

a) ASW : Austraria Standard White

b) 窒素肥料の施用量：初期 0.9 kg N/a、追肥なし

c) 窒素肥料の施用量：初期 0 kg N/a、追肥 0.3 kg N/a

3.2. 原料組成、配合比率の検討②

- ・ 食品に使用する糖類の種類を見直し、還元糖を低減する。

加熱前に、主に食品に甘みを付与するために、砂糖、はちみつ、メープルシロップ、水あめ、ぶどう糖、果糖、異性化液糖、トレハロース、キシリトール、ソルビトールなどが原料として使用される場合がある。還元糖を多く含む甘味原料を還元糖の割合が少ない甘味原料で代替すれば、アクリルアミドの生成量を減らせる可能性がある。

また、還元糖を含む甘味原料は、しばしば着色の目的でも使用されるが、還元糖の中でも、果糖はぶどう糖よりもアクリルアミドを生成しやすいことが知られている (Amrein, et al., 2006; Codex, 2009; Hamlet, et al., 2008)。このため、着色の目的で還元糖を使用する場合には果糖よりもぶどう糖を用いることが推奨される。

農林水産省が行った試験において、ビスケット類では、原料のグラニュー糖を上白糖へ置き換えた場合には、アクリルアミド濃度に有意な差はなかったが、グラニュー糖の一部を異性化液糖又はぶどう糖に置き換えた場合には、その置換率によっては有意にアクリルアミド濃度が高くなった(図 11)。なお、本試験では、異性化液糖やぶどう糖の使用により、香ばしさや焼き色の美しさが増した一方で、置換率が大きいと焦げが発生するなど、風味への影響も確認された。

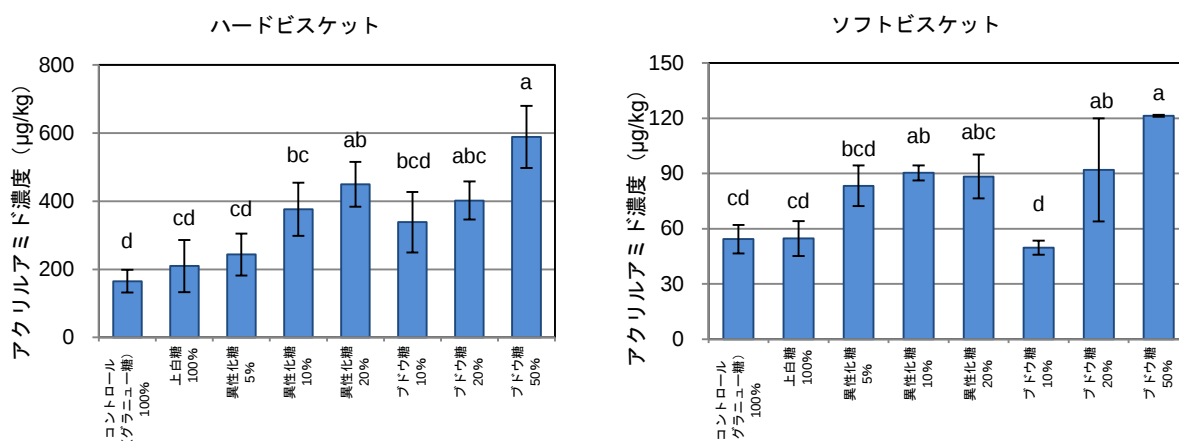


図 11 ハードビスケット及びソフトビスケットにおける、糖類のアクリルアミド濃度への影響
 繰返し試験数: n=3、縦棒は平均値、エラーバーは標準偏差、糖類の%表示はグラニュー糖からの置換率
 異なるアルファベット間には Tukey の HSD 検定で有意水準 5%で有意差あり
 (農林水産省、試験協力: 一般社団法人全国ビスケット協会)

3.3. 原料組成、配合比率の検討③

- ・ アクリルアミド生成反応を促進する食品や食品添加物の使用を控える。

食品や食品添加物の中にはアクリルアミドの生成を促進するものがあり、その要因として、食品の pH や食品添加物中のアンモニウムが考えられている。

アミノ・カルボニル反応は、一般的に pH が高くなるほど促進される。水酸化ナトリウム又は硝酸で pH を調整したばれいしょ粉を、170℃で 6 分間加熱したモデル試験では、pH が 7～7.5 の場合にアクリルアミド濃度が最も高く、pH が低くなるほど（酸性側になるほど）アクリルアミド濃度が低くなった（図 12）。したがって、食品の pH を上げる作用のある食品添加物を使用するとアクリルアミドの生成を促進する可能性がある（Mestdagh, et al., 2008a）。

アンモニウム塩は、アミノ・カルボニル反応を促進し、食品の着色を強める作用がある。ジンジャーブレッドの場合、膨張剤の炭酸水素アンモニウム（ NH_4HCO_3 ）の添加量を増やすほど、アクリルアミド濃度が高くなり、炭酸水素アンモニウムがアクリルアミド生成に強い影響を及ぼすことが報告されている（図 13）（Amrein, et al., 2004）。

また、同試験で、膨張剤を炭酸水素アンモニウム（ NH_4HCO_3 ）から炭酸水素ナトリウム（重曹、 NaHCO_3 ）に変更するとアクリルアミド濃度が 60%以上低減したことが報告されている（図 14）。炭酸水素アンモニウムを使用したものは炭酸水素ナトリウムを使用したものより食品の pH が低いことから、本試験では、pH よりもアンモニウム塩濃度の方がアクリルアミド生成の大きな要因であったことが示唆されている（Ciesarová, et al., 2009; Kukurová, et al., 2013; Sadd, et al., 2008）。

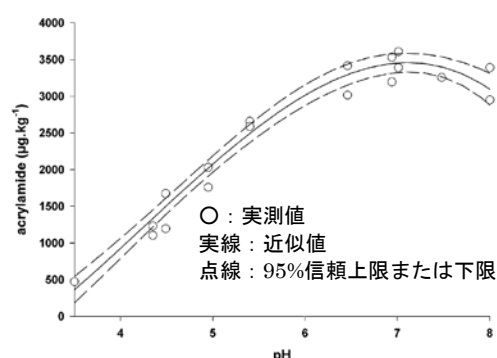


図 12 ばれいしょモデル試験でのアクリルアミド生成における pH の影響（Mestdagh, et al., 2008a）

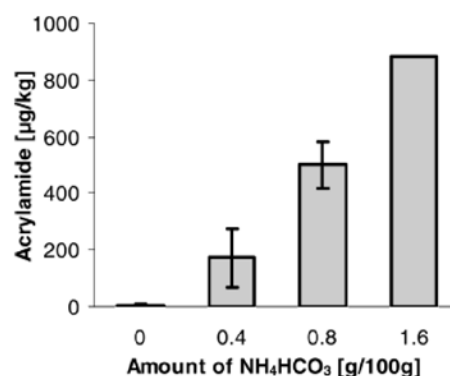


図 13 異なる濃度の炭酸水素アンモニウムを膨張剤として使用した場合のジンジャーブレッドのアクリルアミド濃度（エラーバーは標準偏差、n=2（1.6 g/100g を除く））（Amrein, et al., 2004）

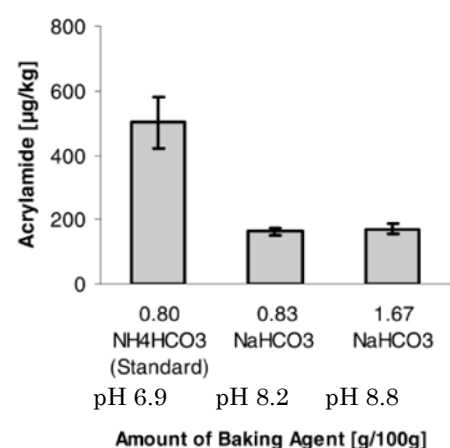


図 14 異なる膨張剤を使用した場合のジンジャーブレッドのアクリルアミド濃度（Amrein, et al., 2004）

3.4. 原料組成、配合比率の検討④

- ・ アクリルアミド生成を抑制する機能をもつ食品や食品添加物を使用する。

食品や食品添加物には、アクリルアミドの生成を抑制する機能をもつものがある。アクリルアミドの生成を抑制する代表的な食品添加物は、有機酸、二価の陽イオンを含む食品添加物、アミノ酸（L-システイン、グリシン、L-リシン（L-Lysine））、ビタミンである。

1. 有機酸

有機酸は、食品の pH を下げることによりアクリルアミドの生成反応を抑制すると考えられている（「3.3. 原料組成、配合比率の検討③」参照）。

ばれいしょ粉に有機酸（クエン酸、酢酸、L-乳酸）を加えた混合物（pH 3.7～4.7）を 170℃で 6 分間加熱したモデル試験では、ばれいしょ粉に水を加えたものと比較して、アクリルアミド濃度が 35～78%低かった（表 5）（Mestdag, et al., 2008a）。また、pH が低いほどアクリルアミド濃度が低かった。

2. 二価の陽イオン

二価の陽イオンは、アクリルアミド生成経路における主要な中間体であるシッフ塩基の生成を抑制することにより、アクリルアミドの生成反応を抑制すると考えられている（Açar, et al., 2012; Gökmen, et al., 2007a; Gökmen, et al., 2007b; Mestdag, et al., 2008b; Sadd, et al., 2008）。

ばれいしょ粉に塩化マグネシウム、塩化カルシウムを加えた混合物を 170℃で 6 分間加熱したモデル試験では、ばれいしょ粉に水を加えたものと比較して、アクリルアミド濃度が 46～82%低かった（表 5）（Mestdag, et al., 2008a）。

表 5 ばれいしょ粉のモデル試験における添加物の影響（Mestdag, et al., 2008 を改変）

	添加物の濃度 (µg/g mixture)	pH	アクリルアミド濃度 (µg/kg)	水を加えた場合と 比較した 濃度の変化率(%)
水	—	5.4	2,492	—
クエン酸	50	4.0	754	-70
	100	3.7	553	-78
酢酸	50	4.7	1,613	-35
	100	4.5	1,341	-46
L-乳酸	100	4.2	937	-62
塩化マグネシウム	100	4.6	1,058	-58
塩化カルシウム	50	5.0	1,353	-46
	100	4.5	459	-82
L-システイン	50	5.5	208	-92
グリシン	50	5.4	1,891	-24
L-リシン(L-Lysine)	50	5.4	1,522	-39

また、小麦粉 40 g に対して、塩化カルシウムの濃度が 0.005~0.04 mol/L となるように調製した水溶液 25 mL を加えて調製した生地を、140℃で 40 分間加熱したモデル試験では、対象群と比較して、アクリルアミド濃度が 11~40%低かった（表 6）（Levine, et al., 2009）。

表 6 小麦粉生地のモデル試験における塩化カルシウムの影響 (Levine, et al., 2009 を改変)

	水溶液中の濃度 (mol/L)	pH	アクリルアミド濃度 (μg/kg)	コントロールと 比較した 濃度の変化率(%)
コントロール	—	5.53	110.5	—
塩化カルシウム	0.005	5.52	98.3	11.0
	0.01	5.52	93.6	15.3
	0.02	5.41	83.1	24.8
	0.04	5.05	65.9	40.4

3. アミノ酸

ある種のアミノ酸は、還元糖とアスパラギンが反応する際に、アスパラギンと競合することにより、アクリルアミドの生成反応を抑制すると考えられている（Mestdagh, et al., 2008b）。

ばれいしょ粉に L-システイン、グリシン、L-リシンを加えた混合物を 170℃で 6 分間加熱したモデル試験では、ばれいしょ粉に水を加えたものと比較して、アクリルアミド濃度が 24~92%低かった（表 5）（Mestdagh, et al., 2008a）。ただし、L-システインなどの含硫アミノ酸を使用すると香りに大きく影響するため、実際の食品に使用することは難しい。

小麦パンでは、焼成前の生地濃度が 0.005%となるようにシステインを加え、220℃で 30 分間焼成すると、対照群（システイン無添加）と比較して、アクリルアミド生成が約 50%抑制されたことが報告されている。ただし、システイン濃度が 0.01%の場合には、生地の形状に影響し、逆にアクリルアミドの生成抑制効果が低下したことが報告されている（図 15）（Claus, et al., 2007）。

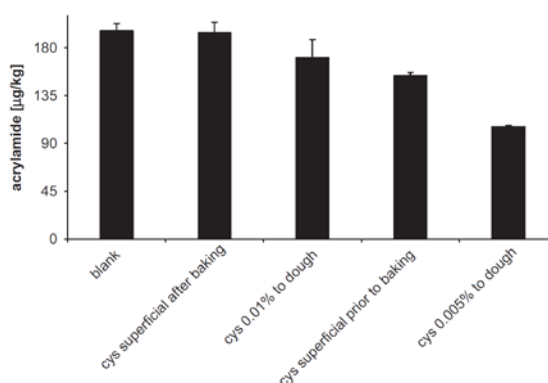
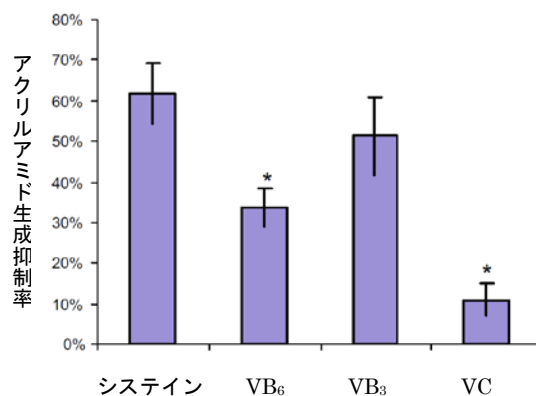


図 15 生地へのシステイン添加が与える小麦パンのアクリルアミド濃度への影響 (n=3, エラーバーは標準偏差を示す) (Claus, et al., 2007)

4. ビタミン（食品添加物としての使用）

各種のビタミンを使用するとアクリルアミドの生成が抑制されたことが報告されている（Li, et al., 2012; Zeng, et al., 2009）。ここでのビタミンの使用は栄養強化を目的としたものではない。また、ビタミンによる生成抑制効果のメカニズムは現時点ではよく分かっていない。

加熱前のポテトを、それぞれ 1% の各種ビタミン又はシステインを含む溶液に 60 分間浸漬してから、170℃で 10 分間揚げたモデル試験では、ビタミン B₆（ピリドキシン塩酸塩、VB₆）、ビタミン B₃（ニコチン酸、VB₃）、ビタミン C（L-アスコルビン酸、VC）を用いた場合、ビタミンを用いなかった場合と比較して、アクリルアミドの生成がそれぞれ 35%、50%、11%抑制されたことが報告されている（図 16）（Zeng, et al., 2009）。また、小麦粉とグルコース、



*は有意水準 5%でシステイン添加と有意差あり

図 16 フレンチフライポテトの各ビタミンによるアクリルアミド生成抑制率（n=3, 平均値±標準偏差）（Zeng, et al., 2009）

アスパラギン、各種ビタミンを混合したものに水を加え攪拌した後、170℃で 5 分間加熱したモデル試験では、水溶性ビタミンを使用した場合はアクリルアミドの生成抑制効果がみられたが、脂溶性ビタミンを使用した場合は生成抑制効果がみられなかった（Zeng, et al., 2009）。一方、クッキーのモデル試験では、脂溶性ビタミンの 1 つであるビタミン E（トコフェロール）を使用した場合はアクリルアミドの生成が抑制された（Li, et al., 2012）。

このように、ビタミンによるアクリルアミドの生成抑制効果は、食品とビタミンの種類の組合せにより異なるため、アクリルアミドの生成抑制を目的としてビタミンを使用する場合は、食品に応じて適切なビタミンを選ぶ。

3.5. 食品の形状の検討

- ・ 加熱前の原料、成型生地などの形状を最適化する。

同じ原料組成であっても、成型後の形状によって、加熱時のアクリルアミドの生成速度や生成量が異なる。これは、形状が違えば表面積と体積の比率が異なり、食品全体への熱の通り方も異なるためである。一般的に、アクリルアミドは食品を高温で加熱するほど生成しやすいため、熱源に近く高温になりやすい食品の表面部は、食品の中心部と比較してアクリルアミド濃度が高くなりやすい。また、表面積／体積比が大きいほど水分が蒸発しやすく、カリカリ、パリパリとした食感が生まれるが、温度が上昇しやすいので、アクリルアミド濃度が高くなりやすい。

また、食品の形状は、食感、風味、生産効率及び油調理の場合の製品の脂質含有量にも影響する。したがって、これらの要素を十分に考慮して、アクリルアミド濃度が低くなるような形状を設計する必要がある。

例えば、パン類では、同じ重量の生地を焼成する場合、細長い棒状よりも丸い塊に成型する方が表面積／体積比が小さくなり、また、パンの皮(耳)の部分が少なくなるため、柔らかくふんわりした食感となり、アクリルアミド濃度を低減できる。また、パン類やビスケット類では生地を多く使い大きく成型する方が、フレンチフライポテトではやや太めにばれいしょをカットする方が表面積／体積比が小さくなるため、アクリルアミド濃度を低減できる (FoodDrinkEurope, 2011)。例えば、14×14 mm にカットしたフレンチフライは、8×8 mm にカットしたものよりも有意にアクリルアミド濃度が低かったことが報告されている (Matthäus, et al., 2004)。

4. 食品の製造、加工又は調理段階での検討事項

4.1. 原料農産物の選別、特定部位の除去

- ・ 原料を大きさや品質で選別する。
- ・ 原料にアスパラギン、還元糖の濃度が高い部位がある場合、加熱前の調製段階で除去する。

同じ種類の農産物でも、大きさによって前駆体濃度が異なる場合がある。

また、農産物に含まれるアスパラギンや還元糖の濃度は、農産物の部位によっても異なる。一般的に、農産物の外皮や種皮、胚芽はアスパラギン濃度が高く、また、病害や傷害を受けた部分は還元糖の濃度が高い。そのような部位があらかじめ分かっており、最終製品の品質特性や栄養特性の観点から重要性が低い場合、その部位を原料の調製時（加熱前）に除去すれば、アクリルアミドの生成量を減らすことができる。

農産物の内部に傷害があっても外観からは分からないことがあるので、製造、加工又は調理の工程で判別可能であれば、適切に傷害部を除去する。この際、近赤外線を利用した光センサーを活用すれば、作物によっては加工前の段階で不良品を選別することが可能である。また、ばれいしょをフレンチフライポテトやポテトチップスに成型した後やブランチング、プリフライなどを実施した後に、黒変部や褐変部があるものを目視や色彩選別機（カラーソーター）によって選別し、除去すると、アクリルアミド低減に有効であり、既に事業者が実施している。

ばれいしょの品種によっては、貯蔵前の打撲の回数が多いと、増加した還元糖が長期貯蔵後の還元糖濃度に影響する（図 17）〔農林水産省, 2013〕。したがって、打撲のないものを調達したり、打撲箇所を取り除いたりすることで、アクリルアミドの生成量を減らすことができ、既に事業者が実施している。

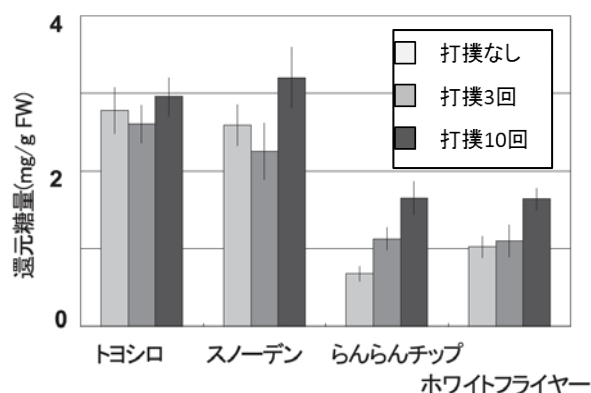


図 17 打撲がばれいしょの長期貯蔵後の還元糖濃度に与える影響〔農林水産省, 2013〕
収穫後に意図的に打撲し、キュアリング後、8℃で 230 日間貯蔵した時の還元糖濃度を調査。打撲 3 回が、一般的な収穫機を用いて収穫した時の打撲回数に相当する。

4.2. 洗浄、ブランチング

- ・ 原料表面のアスパラギンや還元糖を洗い流す。
- ・ 原料をブランチングし、アスパラギンや還元糖を溶出させる。

野菜類やいも類を原料とする場合、加熱前に、カット又はスライスした原料を水にさらしたり、流水で洗ったりすると、農産物の表面にある遊離したアスパラギンや還元糖を洗い流すことができる。また、水での洗浄に加え、約 40～80℃の湯でブランチングすると、アスパラギンや還元糖の溶出効果を高めることができる。さらに、ブランチングによって一次加熱することで、揚げ調理における二次加熱の時間を短縮することができる。これらを行うことによって、アクリルアミドの生成量を減らすことができる。

フレンチフライポテトでは、ブランチング時間が長く、水温が高いほど、カットしたばれいしょの還元糖濃度が低くなり、フレンチフライポテトに加工した際のアクリルアミド濃度も低くなることが報告されている（図 18）（Mestdagh, et al., 2008）。

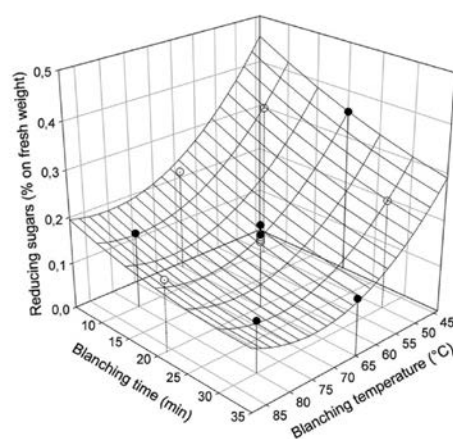


Fig. 1. Response surface plot of the reducing sugar content of potato strips as influenced by blanching time and temperature, with the measured values above (●) and below (○) the surface.

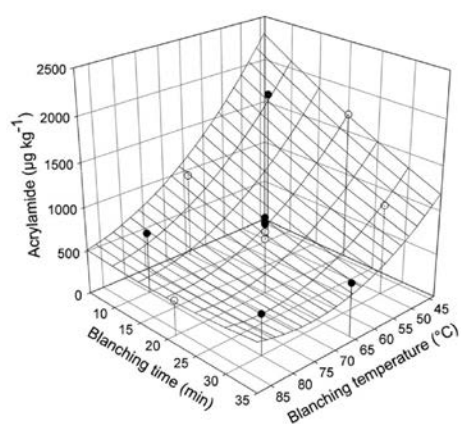


Fig. 2. Response surface plot of the acrylamide content in French fries as influenced by blanching time and temperature, with the measured values above (●) and below (○) the surface.

図 18 ブランチング時間、温度がばれいしょの還元糖濃度及びフレンチフライのアクリルアミド濃度に及ぼす影響 (Mestdagh, et al., 2008c)

なお、ブランチングによって、アスパラギン以外の遊離アミノ酸、還元糖、でん粉、水溶性のビタミン類などが溶出する可能性があり、製品の風味や栄養にも影響する可能性がある。

4.3. pH 調整

- ・ 原料農産物を酸性溶液で処理する。

一般的に pH が低いほどアミノ・カルボニル反応が抑制されるため、食品の pH が低くなるように調整すると加熱によるアクリルアミドの生成を抑制することができる（「3.3. 原料組成、配合比率の検討③」参照）。

そのため、洗浄やブランチングを行う農産物については、使用する溶液に pH を下げる効果のある食品添加物を使用することで、アクリルアミドの生成を抑制できる場合がある。

例えば、クエン酸を加えると、アクリルアミドの低減に効果があることが複数報告されている【中野, ほか, 2007; Jung, et al., 2003; Pedreschi, et al., 2007）。

また、有機酸（クエン酸、酢酸、L-乳酸）又はピロリン酸二水素二ナトリウムを含む溶液を用いて、1.5 mm の厚さにスライスしたばれいしょを 65℃で 5 分間ブランチングして、170℃で 3 分間揚げた場合、いずれの物質でもアクリルアミドの生成が抑制されたことが報告されている（表 7）（Mestdagh, et al., 2008a）。

なお、アクリルアミドの低減対策としてブランチング溶液の pH を下げると製品の酸味に影響することがあるので、低減対策を実施する前に、風味に与える影響についても検証する必要がある。

表 7 ブランチング溶液の pH がアクリルアミドの生成に与える影響（Mestdagh, et al., 2008 を改変）

	添加物の濃度 (mol/L)	ブランチング 溶液の pH	ブランチング後の ばれいしょの pH	水を加えた場合 と比較したアクリルアミド濃度 の変化率(%)※
水	—	7.1	6.7	0
クエン酸	0.025	2.5	4.1	-98 (±16)
	0.05	2.3	3.4	-100 (±16)
酢酸	0.025	3.8	4.8	-80 (±13)
	0.05	3.7	4.6	-79 (±13)
L-乳酸	0.025	3.2	4.8	-89 (±14)
	0.05	2.9	3.9	-100 (±16)
ピロリン酸二 水素二ナトリ ウム	0.05	4.7	6.0	-83 (±13)

※括弧内は 95%信頼区間を示す。

4.4. 発酵

- ・ 酵母による生地を発酵を行う場合、発酵時間を十分に確保する。

パンを製造する際に生地を発酵させると、酵母が生育のために生地中に含まれる遊離アミノ酸や糖を消費するため、生地中のアスパラギンや還元糖の濃度も低くなる。また、生地が発酵によって二酸化炭素や乳酸、酢酸が生成するため、生地の pH が低くなる。そのため、十分に生地を発酵させることで、生地の焼成時に生じるアクリルアミドの生成抑制が期待できる。

小麦パンでは、90 分間の発酵によって、発酵させる前の生地と比較してアスパラギン濃度が 80%以上低減したことや、クラッカーでは、100 分間の発酵によって、発酵させる前の生地と比較してアスパラギン濃度が 3 分の 1 に低下したことが報告されている (Granby, et al., 2008; Sadd, et al., 2008)。ただし、発酵時間が長すぎると、生地の加工適性に影響する。

中国式揚げパン（油条）では、生地中の酵母の添加量を増やすほど、また、発酵時間を長くするほど、生地の遊離アスパラギン濃度が低下するため、アクリルアミドの生成が抑制されたことが報告されている（図 19）(Huang, et al., 2008)。

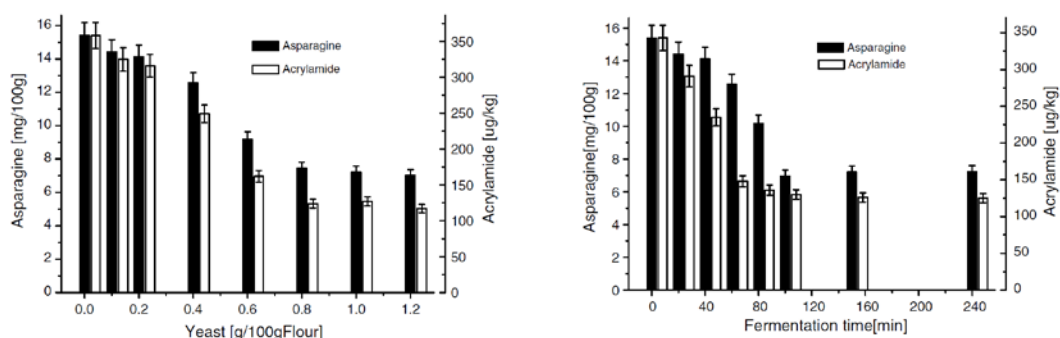


図 19 油条の酵母添加量及び発酵時間がアスパラギンとアクリルアミドの濃度に及ぼす影響 (Huang, et al., 2008)

乳酸菌(*Lactobacillus plantarum* NC8)は、糖を乳酸に代謝するので、乳酸発酵によって還元糖の濃度を低下させるとともに pH も低下させることができる。フレンチフライポテトでは、プリフライの前に 37°C で 120 分間の乳酸発酵を行うと、揚げた時のアクリルアミドの生成が 70%抑制されたことが報告されている (Baardseth, et al., 2006)。

なお、生地の pH が低くなると焼成時のアクリルアミドの生成は抑えられるが、3-MCPD の濃度は逆に高くなることが報告されている（図 20）(Sadd, et al., 2008)。

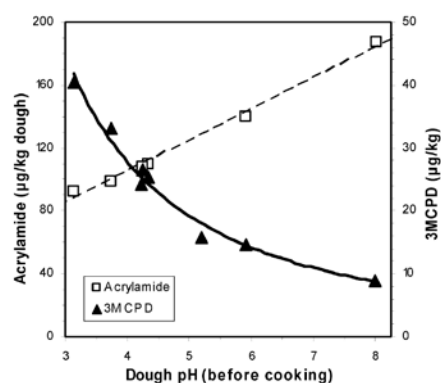


図 20 生地の pH によるアクリルアミド及び 3-MCPD 濃度への影響 (Sadd, et al., 2008)

4.5. 加熱①

- ・ 加熱しすぎないように、最適な加熱温度と加熱時間を設定する。
- ・ 意図的に強く焼き目や焦げ目をつけることを避ける。

一般的に、加熱温度が高いほど、また、加熱時間が長いほど、食品のアクリルアミド濃度は高くなる。アクリルアミドの生成を抑制するためには、食品の加熱条件を最適化し、過加熱を避ける必要がある。

アクリルアミドは、加熱温度が120℃以上で生成しやすくなり、100℃以下では加熱前と比較し有意に増加しない（図 21）（Tareke, et al., 2002）。

ビスケット類では、加熱時間が長いほどアクリルアミド濃度が高いこと、また、加熱温度が高いほどアクリルアミド生成速度が大きいことが報告されている（図 22）。

一般的に、食品を意図的に焦がしたり、焼き色を強くつけたりすると、アクリルアミドが生成しやすい。

さらに、食品を強く加熱した場合には、アクリルアミドだけでなく、その他の有害化学物質が意図せず生成する可能性があるため、食品の安全性向上のためには、意図的に強い焦げ目をつける行為は避けることが望ましい。

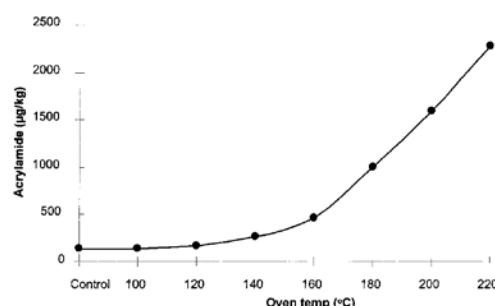


図 21 温度制御したオープンで加熱したフレンチフライポテトのアクリルアミド濃度（重量補正）
(Tareke, et al., 2002)

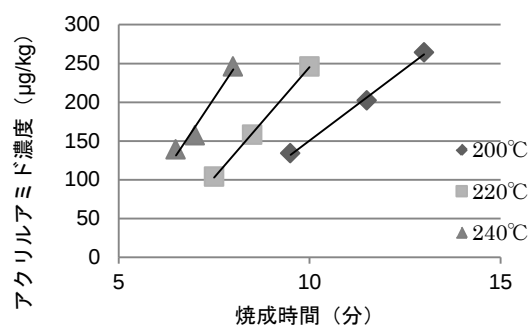


図 22 ビスケットの焼成時間とアクリルアミド濃度
(農林水産省、試験協力：一般社団法人全国ビスケット協会)

4.6. 加熱②

- ・ 食品の水分含有率が低い状態での過加熱を避ける。

食品の水分含有率が低い状態は、高い状態と比較して、加熱した時に食品の温度が上がりやすく、アクリルアミドが生成しやすくなる。したがって、一般的に、加熱によって水分含有率が低くなりやすい食品表面はアクリルアミド濃度が高く、水分含有率が低くなりにくい中心部はアクリルアミド濃度が低い。アクリルアミド生成を抑制するためには、食品表面の水分含有率と温度を管理することが特に重要である。

例えば、ビスケットの試験では、厚さ 10 mm の生地を 200℃で 15 分間焼成したとき、表層 1 mm の部分のアクリルアミド濃度は 380 µg/kg であったが、中心部分からは検出されなかったことが報告されている (Açar, et al., 2009)。また、同様に調製した厚さ 1 mm と厚さ 10 mm の生地（焼成前の水分含有率 16-17%）を 180℃で焼成したとき、厚さ 1 mm の生地では加熱後速やかに水分含有率が 4%未満に低下し、同時にアクリルアミド濃度が上昇して 8 分後には最大濃度（その後、指数関数的に減少）となったのに対し、厚さ 10 mm の生地では水分含有率が 10%以下まで減少するのに 15 分かかり、その時点まではアクリルアミドの生成が認められなかったことが報告されている (Açar, et al., 2009)。

生地表面の乾燥、過加熱を防ぐには、スチームや降温制御が利用なオーブンが有効である (HEATOX, 2007)。パンを、スチーム有り又は降温制御で焼成した場合、スチームなしかつ恒温焼成の場合と比較して、パン表面のアクリルアミドの生成が有意に抑制されたことが報告されている (図 23) (Ahrné, et al., 2007)。

また、ビスケット類のアクリルアミド生成の抑制にも、スチームオーブンの使用が有効であることが報告されている (Isleroglu, et al., 2012)。

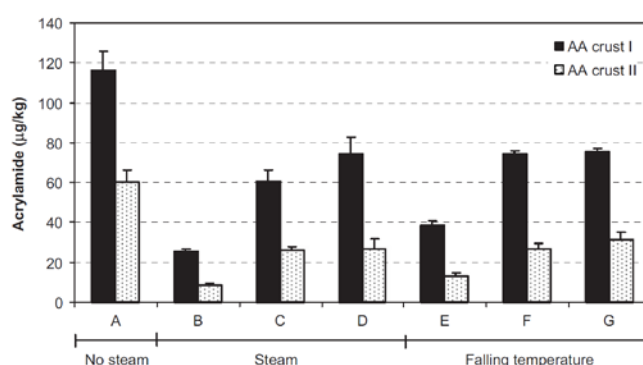


図 23 スチーム焼成又は降温焼成した場合のパン表面のアクリルアミド濃度（焼成時間 20 分） (Ahrné, et al., 2007)

A: スチームなし（恒温焼成）、B: スチーム（5-20 分）、C: スチーム（10-20 分）、D: スチーム（15-20 分）、E: スチームなし（焼成 5 分後に降温）、F: スチームなし（焼成 10 分後に降温）、G: スチームなし（焼成 15 分後に降温）

クラスト I: 表面 1 mm、クラスト II: 表面 2 mm

4.7. 加熱③

- できるだけ均一な薄い色になるように加熱する。

食品の種類によっては、加熱後の食品の着色度とアクリルアミド濃度との間に正の相関が認められるものがあり、焼き色や揚げ色がアクリルアミド濃度の目安となる場合がある。

ポテトチップスやフレンチフライポテトでは、アグトロ値や CIELAB の L*値又は a*値と高い相関があることが知られており（図 24）、一般的に、焼き色や揚げ色が薄い（明るい）ほどアクリルアミド濃度が低い傾向にある（表 8）（Vinci, et al., 2010）。

表 8 各指標値とフレンチフライポテトのアクリルアミド濃度のピアソン相関係数（Vinci, et al., 2010）の Table. 2 を改編）

指標	r（ピアソン相関係数）
USDA 色見本	0.68 ^a
アグトロ値	-0.88 ^a
L*	-0.59 ^a
a*	0.80 ^a
b*	-0.22 ^b

注釈 ^ap<0.01; ^bp<0.05

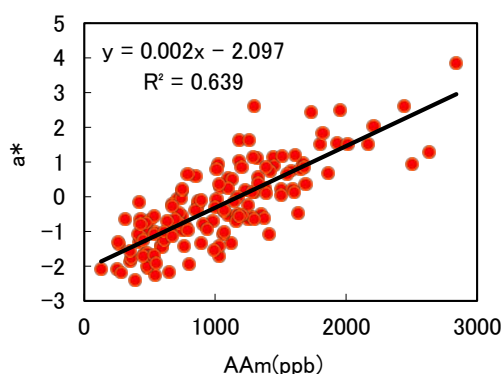


図 24 テストフライしたポテトチップスのアクリルアミド濃度と a*値の関係（カルビー株式会社提供）

したがって、加熱による食品の着色度をアクリルアミド濃度の目安にできる食品の場合は、最終製品の基準色を設定し、それよりも色が薄くなるようにすれば、最終製品のアクリルアミド濃度を一定水準以下に抑制できる。

農林水産省が行った冷凍フレンチフライの調理試験では、加熱時間を長くするほど色が濃くなり、アクリルアミド濃度も高くなった（図 25）。一般の人による試食では、揚げ色が薄くても、濃い場合と比べて風味に遜色はないと評価された。

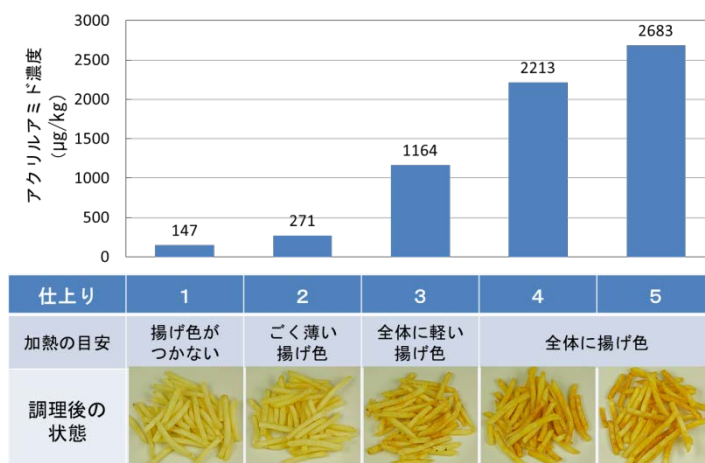


図 25 フレンチフライの揚げ色とアクリルアミド濃度（農林水産省、試験協力：（独）農研機構食品総合研究所、女子栄養短期大学）

4.8. 余熱の管理

- ・ 加熱後、余熱を速やかに取り除く。

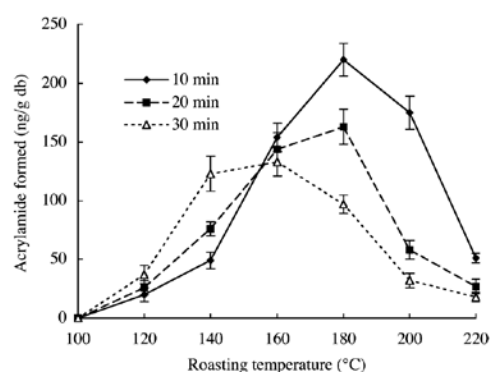
食品を 120℃よりも高い温度で加熱した際、加熱終了後に食品の温度が 120℃以上を保っており、かつ、前駆体が食品中に残っていると、余熱でアクリルアミドが生成する可能性がある。したがって、加熱後に速やかに食品の余熱を取り除き、120℃未満まで冷却すれば、加熱終了後にアクリルアミドが追加的に生成するのを抑制できる (EFSA, 2003)。例えば、ばれいしょをスライスした試料を 180℃で 20 分間揚げ、液体窒素で急冷した場合のアクリルアミド濃度は、室温まで自然冷却したものよりも 14%低減したことが報告されている (Ishihara, et al., 2006)。

食品製造現場で比較的簡単に食品の余熱を除去するために、送風機やスポットクーラーを活用することが考えられる。ただし、実行可能性やアクリルアミド生成抑制効果は製造、加工又は調理の条件により異なるため、施設に応じて最適な余熱除去方法を選択する。ポテトチップスを高温でごく短時間揚げの場合は、加熱後の冷却がアクリルアミド生成の抑制に有効であり (FoodDrinkEurope, 2011)、送風機やスポットクーラーはすでに実用化されている。

(参考) 余熱の除去が逆効果となる事例

一部の焙煎食品（コーヒー豆、ほうじ茶など）では、ある一定以上の温度又は時間加熱するとアクリルアミド濃度が低くなるため

(Mizukami, et al., 2006; Summaa, et al., 2007; Taeymans, et al., 2004)、余熱の除去はアクリルアミドの低減に効果がないばかりか、むしろ逆効果となる場合がある。ただし、それらの食品を強く加熱した時にアクリルアミド濃度が低くなるメカニズムは現時点ではよく分かっていない。



ほうじ茶の焙煎温度、焙煎時間とアクリルアミド濃度 (Mizukami, et al., 2006)

4.9. 不良品の選別

- ・ 焦げたものや小片、破片は、加熱調理後、選別によって取り除く。

黒く焦げた部位や加熱により強く着色した部位は、通常よりもアクリルアミド濃度が高い可能性があるため、加熱後、色彩選別機（カラーソーター）や目視によって選別し、除去することで製品のアクリルアミド濃度を低く抑えることができる。これらの選別は、食品の色をより正しく判断するため、調味付けや二次加工の前に行う必要がある。

実際に、ビスケットやポテトチップスでは、焦げの面積とアクリルアミド濃度には高い正の相関があり、ライン上での画像解析がアクリルアミド濃度の管理に有効であることが報告されている（Gökmen, et al., 2010）。

焦げたり、加熱により強く着色したりした食品の除去に適した様々な色彩選別機が市販され、既にポテト系スナックなどを製造している事業者が導入しており、アクリルアミドの低減対策にも活用できる。

これらの不良品の選別は、食品事業者が製造、加工又は調理の工程の最後に実施可能な低減対策であり、丁寧に行う。選別工程で不良品が多く生じるような場合には、原料の調製や加熱の条件などを見直す。

なお、加熱装置内に取り残された小片や破片は、過加熱されやすく、また、繰り返し加熱されることでアクリルアミドの濃度が高くなる可能性があるため、それらの小片や破片が選別工程で適切に除去されず最終製品に混入すると、最終製品のアクリルアミド濃度が高くなる可能性がある。そのため、加熱調理後の食品から焦げた不良品を選別するだけでなく、バッチ式の加熱方法を採用している場合にはバッチ毎に、連続式の加熱方法を採用している場合には定期的に、フライヤーやオーブン内の清掃を行い、小片や破片を除去する。

4.10. 調理方法に関する情報提供

- ・ 食べる時に加熱が必要な食品は、適切な調理方法を容器包装への表示又はその他の手段で情報提供する。

食品事業者がアクリルアミド濃度の低い製品を消費者や飲食業者に提供したとしても、最終調理者がその製品を適切に調理しないと、消費者のアクリルアミドへの暴露の低減にはつながらない。

食べる前の加熱によるアクリルアミドの生成を抑制するためには、容器包装への表示や、ウェブサイト、講習会などの機会を活用し、食品の調理者に対して、適切な取扱いについて分かりやすく情報提供することが有効である。そして、情報提供の内容は、実行可能なものであり、アクリルアミドの生成抑制を通じて消費者の暴露の低減につながるものであり、誤解を招かない表現でなければならない。例えば、調理例の写真を用いると分かりやすく、調理者が参考にできる。逆に、「きつね色になるまで加熱する」などの人によって解釈が異なると考えられる表現や、「お好みの色まで加熱する」などの曖昧な表現は適切ではない。

例えば、フレンチフライポテトのアクリルアミド低減調理に関する指示（原料の解凍方法、加熱温度、加熱時間など）の効果を検証した試験では、指示を忠実に実施した店舗ではアクリルアミド濃度が指示前と比較して統計学的に有意に低減した。一方、好みの揚げ色や堅さを優先し、揚げ油の温度や加熱時間の指示に忠実に従わなかった店舗では、指示前と比較してアクリルアミド濃度に有意な変化が無いか、むしろ、高くなったことが報告されている（Sanny, et al., 2013）。

5. 実用化が期待される低減技術

アクリルアミド低減を目的とする技術や資材は、現時点では研究開発の段階であったり、日本では認可されていなかったりするが、将来、実用化が期待できるものもある。以下に、諸外国で実用化されていたり、国内外で実用化が期待されていたりするものを示す。

5.1. 生産段階

- **ばれいしょ新品種の開発**

貯蔵中に還元糖が増加すると、アクリルアミドがより多く生成し、また、チップカラーが悪くなるため、現在、我が国では、低温でも還元糖が増加しにくい「スノーデン」などの品種が使用されている。この「スノーデン」にも中晩生でジャガイモシストセンチュウに対する抵抗性がないなどの課題がある。新たに開発された「北育 15 号」は、中生で「スノーデン」よりも枯ちよう期が早く、チップ品質が優れ、ジャガイモシストセンチュウに対する抵抗性がある（北見農試育成、品種登録申請済み、出願公表はまだされていない）。

また、加工用ばれいしょを周年で供給するためには、北海道産のばれいしょを貯蔵するだけではなく、暖地産の供給も必要である。現在は「トヨシロ」が主に栽培されているが、より暖地の栽培に適する品種の育成が進められている。

- **ばれいしょの貯蔵技術の開発**

海外では、貯蔵中に萌芽抑制剤を使用し、芽の伸張を抑制しているが、日本では認可されている萌芽抑制剤がない。エチレンは、一般的に萌芽抑制作用があるといわれているが、品種によってその効果が異なり、エチレン処理直後にはチップカラーの悪化が見られるなどの課題もあるため、適切な処理方法や処理後のチップカラーを改善する対策の検討が進められている。

5.2. 加工段階

• アスパラギナーゼ（アスパラギン分解酵素）の利用

アスパラギナーゼを加熱前の食品に添加すると、アスパラギンをアスパラギン酸とアンモニアに加水分解し、アクリルアミドの生成を抑制する。海外の多くの国や地域では、遺伝子組換え微生物を利用して製造されたアスパラギナーゼが既に複数の事業者から市販されており、食品中のアクリルアミドの低減のために利用されている。

現在、我が国では、アスパラギナーゼは食品衛生法で食品添加物として指定されていないので、国内で販売する食品にアスパラギナーゼを使用するためには、食品安全委員会が食品健康影響評価を行った後、厚生労働省が食品添加物として新たに指定する必要がある。

(参考) 我が国における「*Aspergillus niger* ASP-72 株を用いて生産されたアスパラギナーゼ」の審査の状況（2013 年 11 月時点）

- ・ 2012 年 9 月 24 日 メーカーが厚生労働省に当該アスパラギナーゼの食品添加物指定を要請
- ・ 2012 年 9 月 26 日 厚生労働省が食品安全委員会に対して当該アスパラギナーゼの食品健康影響評価を依頼

食品安全委員会での審議状況

(遺伝子組換え微生物を利用して製造された添加物としての安全性審査)

- ・ 2012 年 11 月 2 日 第 109 回遺伝子組換え食品等専門調査会で審議
- ・ 2013 年 8 月 2 日 第 484 回食品安全委員会です承
- ・ 2013 年 8 月 6 日～9 月 4 日 パブリックコメントを募集（終了）
(食品添加物としての安全性審査)
- ・ 2013 年 2 月 22 日 第 115 回添加物専門調査会で審議
- ・ 2013 年 9 月 30 日 第 489 回食品安全委員会です承
- ・ 2013 年 10 月 22 日～11 月 20 日 パブリックコメントを募集

• アスパラギン分解効果の高い酵母の利用

海外では、アスパラギン分解能力の高い酵母によるアクリルアミド低減技術について、商業レベルでの検証が進められている。

• アクリルアミド低減に効果がある食品添加物の利用

海外では、アクリルアミドの生成を抑制するために、クエン酸一ナトリウムが使用される場合がある。現在、我が国では、クエン酸一ナトリウムは食品添加物として指定されていないので、国内で販売する食品にクエン

酸一ナトリウムを使用するためには、厚生労働省が食品添加物として新たに指定する必要がある。

引用文献

- Açar Ö. Ç. [et al.]** Effect of Calcium on Acrylamide Level and Sensory Properties of Cookies [Journal] // Food and Bioprocess Technology. - 2012. - 2 : Vol. 5. - pp. 519-526.
- Açar Ö. Ç. and Gökmen V.** Investigation of acrylamide formation on bakery products using a crust-like model [Journal] // Molecular Nutrition & Food Research. - 2009. - 12 : Vol. 53. - pp. 1521–1525.
- Ahrné L. [et al.]** Effect of crust temperature and water content on acrylamide formation during baking of white bread: Steam and falling temperature baking [Journal] // LWT - Food Science and Technology. - 2007. - 10 : Vol. 40. - pp. 1708–1715.
- Amrein T. M. [et al.]** Acrylamide in Gingerbread: Critical Factors for Formation and Possible Ways for Reduction [Journal] // Journal of Agricultural and Food Chemistry. - 2004. - 13 : Vol. 52. - pp. 4282-4288.
- Amrein T. M. [et al.]** Investigations on the Promoting Effect of Ammonium Hydrogencarbonate on the Formation of Acrylamide in Model Systems [Journal] // Journal of Agricultural and Food Chemistry. - 2006. - 26 : Vol. 54. - pp. 10253–10261.
- Amrein T. M. [et al.]** Occurrence of acrylamide in selected foods and mitigation options [Journal] // Food Additives & Contaminants. - 2007. - Supplement 1 : Vol. 24. - pp. 13-25.
- Baardseth P. [et al.]** Lactic Acid Fermentation Reduces Acrylamide Formation and Other Maillard Reactions in French Fries [Journal] // Journal of Food Science. - 2006. - 1 : Vol. 71. - pp. C28–C33.
- Benedito de Barber C., Prieto J.A. and Collar C.** Reversed-Phase High-Performance Liquid Chromatography Analysis of Changes in Free Amino Acids During Wheat Bread Dough Fermentation [Journal]. - [s.l.] : Cereal Chemistry. - 4 : Vol. 66. - pp. 283-288.
- Ciesarová Z. [et al.]** Improvement of Cereal Product Safety by Enzymatic Way of Acrylamide Mitigation [Journal] // Czech Journal of food sciences. - 2009. - Vol. 27. - pp. S96-S98.
- Claus A. [et al.]** Impact of formulation and technological factors on the acrylamide content of wheat bread and bread rolls [Report]. - [s.l.] : Journal of Cereal Science, 2007.
- Codex** Report [Conference] // Thirty-Second Session Codex Alimentarius Commission. - Rome, Italy : Codex Alimentarius, 2009. - Vol. ALINORM 09/32/REP.
- De Wilde T. [et al.]** Selection criteria for potato tubers to minimize acrylamide formation during frying [Journal] // Journal of agricultural and food chemistry. - 2006. - 6 : Vol. 54. - pp. 2199-2205.

- EC COMMISSION RECOMMENDATION** of 10.1.2011 on investigations into the levels of acrylamide in food. - [s.l.] : EUROPEAN COMMISSION, 10 1, 2011.
- EC COMMISSION RECOMMENDATION** of 8.11.2013 on investigations into the levels of acrylamide in food. - 2013.
- EFSA Report of the Workshop [Conference]** // Workshop on Acrylamide Formation in Food. - 2003.
- FoodDrinkEurope** The FoodDrinkEurope Acrylamide Toolbox 2011 [Online] // The FoodDrinkEurope Acrylamide Toolbox. - 9 30, 2011. - http://www.fooddrink europe.eu/uploads/publications_documents/Toolboxfinal260911.pdf.
- Gökmen V. and Burçe A.** Computer vision-based image analysis for rapid detection of acrylamide in heated foods [Journal] // Quality Assurance and Safety of Crops & Foods. - 2010. - 4 : Vol. 2. - pp. 203–207.
- Gökmen V. and Şenyuva H. Z** Acrylamide formation is prevented by divalent cations during the Maillard reaction [Journal] // Food Chemistry. - 2007a. - 1 : Vol. 103. - pp. 196–203.
- Gökmen V. and Şenyuva H. Z.** Effects of some cations on the formation of acrylamide and furfurals in glucose-asparagine model system [Journal]. - [s.l.] : Eur Food Res Technol, 2007b. - Vol. 225. - pp. 815-820.
- Granby K. [et al.]** Acrylamide–asparagine relationship in baked/toasted wheat and rye breads [Journal] // Food Additives & Contaminants: Part A. - 2008. - 8 : Vol. 25. - pp. 921-929.
- Granvogl M. [et al.]** Quantitation of 3-Aminopropionamide in Potatoes A Minor but Potent Precursor in Acrylamide Formation [Journal] // Journal of Agricultural and Food Chemistry. - 2004. - 15 : Vol. 52. - pp. 4751-4757.
- Granvogl M. and Schieberle P.** Thermally Generated 3-Aminopropionamide as a Transient Intermediate in the Formation of Acrylamide [Journal] // Journal of Agricultural and Food Chemistry. - 2006. - 16 : Vol. 54. - pp. 5933-5938 .
- Hamlet C. G., Sadd P. G. and Liang L.** Correlations between the Amounts of Free Asparagine and Saccharides Present in Commercial Cereal Flours in the United Kingdom and the Generation of Acrylamide during Cooking [Journal]. - [s.l.] : J. Agric. Food Chem, 2008. - Vol. 56. - pp. 6145-6153.
- HEATOX** HEATOX: Heat-generated food toxicants: identification, characterisation and risk minimisation. Final report [Online] // [heatox.org](http://www.slv.se.wstub.archive.org/www.slv.se/upload/heatox/documents/Heatox_Final%20_report.pdf). - 2007. - http://www.slv.se.wstub.archive.org/www.slv.se/upload/heatox/documents/Heatox_Final%20_report.pdf.
- Hironaka K. [et al.]** Sugar and starch contents of processing potatoes during reconditioning [Journal] // Food Preservation Science. - 2003. - 2 : Vol. 29. - pp. 95-100.
- Horita H. and Honda I.** Relationship between Flour Color Index of Darkness and Free Tryptophan Content of Domestically Produced Wheat Flour [Journal]. -

- [s.l.] : Nippon Shokuhin Kagaku Kogaku Kaishi, 2005. - 11 : Vol. 52. - pp. 538-541.
- Huang W. [et al.]** Effects of frying conditions and yeast fermentation on the acrylamide content in you-tiao, a traditional Chinese, fried, twisted dough-roll [Journal] // Food Research International. - 2008. - 9 : Vol. 41. - pp. 918–923.
- IARC** IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans [Journal]. - [s.l.] : IARC, 1994. - Vol. 60.
- Ishihara K. [et al.]** Examination of Conditions Inhibiting the Formation of Acrylamide in the Model System of Fried Potato [Journal] // Bioscience, Biotechnology, and Biochemistry. - 2006. - 7 : Vol. 70. - pp. 1616-1621.
- Isleroglu H. [et al.]** Effect of Steam Baking on Acrylamide Formation and Browning Kinetics of Cookies [Journal] // Journal of Food Science. - 2012. - 10 : Vol. 77. - pp. E257–E263.
- JECFA** Safety evaluation of certain contaminants in food. [Journal] // WHO Food Additives Series. - [s.l.] : WHO, 2006. - Vol. 55.
- JECFA** Safety evaluation of certain food additives and contaminants. [Journal] // WHO Food Additives Series. - [s.l.] : FAO and WHO, 2011. - Vol. 63.
- Jin C., Wu X. and Zhang Y.** Relationship between antioxidants and acrylamide formation: A review [Journal] // Food Research International. - [s.l.] : Elsevier, 2013. - 2 : Vol. 51. - pp. 611–620.
- Jung M.Y., Choi D.S. and Ju J.W.** A Novel Technique for Limitation of Acrylamide Formation in Fried and Baked Corn Chips and in French Fries [Journal] // Journal of Food Science. - 2003. - 4 : Vol. 68. - pp. 1287–1290.
- Kukurová K. [et al.]** Raising agents strongly influence acrylamide and HMF formation in cookies and conditions for asparaginase activity in dough [Journal] // European Food Research and Technology. - [s.l.] : Springer-Verlag, 4 2013. - Vol. in press.
- Li D. [et al.]** Study on Mitigation of Acrylamide Formation in Cookies by 5 Antioxidants [Journal] // Journal of Food Science. - 2012. - 11 : Vol. 77. - pp. C1144–C1149.
- Matsuura-Endo C. [et al.]** Effects of Storage Temperature on the Contents of Sugars and Free Amino Acids in Tubers from Different Potato Cultivars and Acrylamide in Chips [Journal] // Bioscience, Biotechnology, and Biochemistry. - 2006. - pp. 1173-1180.
- Matthäus B., Haase N. U. and Vosmann K.** Factors affecting the concentration of acrylamide during deep-fat frying of potatoes [Journal] // European Journal of Lipid Science and Technology. - 2004. - 11 : Vol. 106. - pp. 793-801.
- Mestdagh F. [et al.]** Impact of additives to lower the formation of acrylamide in a potato model system through pH reduction and other mechanisms [Journal] // Food Chemistry. - 2008a. - 1 : Vol. 107. - pp. 26-31.
- Mestdagh F. [et al.]** Impact of chemical pre-treatments on the acrylamide formation and sensorial quality of potato crisps [Journal] // Food Chemistry. -

- 2008b. - 3 : Vol. 106. - pp. 914–922.
- Mestdagh F. [et al.]** Optimization of the blanching process to reduce acrylamide in fried potatoes [Journal] // LWT - Food Science and Technology. - 2008c. - 9 : Vol. 41. - pp. 1648–1654.
- Mizukami Y. [et al.]** Analysis of Acrylamide in Green Tea by Gas Chromatography-Mass Spectrometry [Journal] // Journal of Agricultural and Food Chemistry. - 2006. - 19 : Vol. 54. - pp. 7370-7377.
- Mottram D. S., Wedzicha B. L. and Dodson A. T.** Acrylamide is formed in the Maillard reaction [Journal] // Nature. - 2002. - Vol. 419. - pp. 448-449.
- Mustafa A. [et al.]** Analysis of free amino acids in cereal products [Journal]. - [s.l.] : Food Chemistry, 2006. - 105. - pp. 317-324.
- NFA** Acrylamide is formed during the preparation of food and occurs in many foodstuffs [Online] // Swedish National Food Administration. - 4 24, 2002.
- Ohara-Takada A. [et al.]** Change in Content of Sugars and Free Amino Acids in Potato Tubers under Short-Term Storage at Low Temperature and the Effect on Acrylamide Level after Frying [Journal] // Bioscience, Biotechnology, and Biochemistry. - 2005. - 7 : Vol. 69. - pp. 1232-1238.
- Pedreschi F. [et al.]** Acrylamide reduction under different pre-treatments in French fries [Journal] // Journal of Food Engineering. - 2007. - 4 : Vol. 79. - pp. 1287–1294.
- Sadd P. A., Hamlet C. G. and Liang L.** Effectiveness of Methods for Reducing Acrylamide in Bakery Products [Journal] // Journal of Agricultural and Food Chemistry. - 2008. - 15 : Vol. 56. - pp. 6154-6161.
- Sanny M. [et al.]** Effect of Frying Instructions for Food Handlers on Acrylamide Concentration in French Fries: An Explorative Study. [Journal] // Journal of Food Protection. - 2013. - 3 : Vol. 76. - pp. 462-472.
- Stadler R. H. [et al.]** Food chemistry: Acrylamide from Maillard reaction products [Journal] // Nature. - 2002. - Vol. 419. - pp. 449-450 .
- Summaa C. A. [et al.]** Impact of the roasting degree of coffee on the in vitro radical scavenging capacity and content of acrylamide [Journal] // LWT - Food Science and Technology. - 2007. - 10 : Vol. 40. - pp. 1849–1854.
- Taeymans D. [et al.]** A Review of Acrylamide: An Industry Perspective on Research, Analysis, Formation, and Control [Journal] // Critical Reviews in Food Science and Nutrition. - 2004. - 5 : Vol. 44. - pp. 323-347.
- Tareke E. [et al.]** Analysis of Acrylamide, a Carcinogen Formed in Heated Foodstuffs [Journal] // Journal of Agricultural and Food Chemistry. - 2002. - 17 : Vol. 50. - pp. 4998–5006.
- US FDA** Acrylamide Questions and Answers [Online] // U.S. Food and Drug Administration. - 6 6, 2013. - <http://www.fda.gov/Food/FoodborneIllnessContaminants/ChemicalContaminants/ucm053569.htm>.
- Vinci R. M. [et al.]** Effective quality control of incoming potatoes as an acrylamide mitigation strategy for the French fries industry [Journal] // Food Additives &

- Contaminants: Part A. - 2010. - 4 : Vol. 27. - pp. 417-425.
- Weber E.A. [et al.]** Impact of nitrogen amount and timing on the potential of acrylamide formation in winter wheat (*Triticum aestivum* L.) [Journal] // Field Crops Research. - 2008. - 106. - pp. 44-52.
- Zeng X. [et al.]** Inhibition of acrylamide formation by vitamins in model reactions and fried potato strips [Journal] // Food Chemistry. - 2009. - 1 : Vol. 116. - pp. 34-39.
- Zyzak D. V. [et al.]** Acrylamide Formation Mechanism in Heated Foods [Journal] // Journal of Agricultural and Food Chemistry. - 2003. - 16 : Vol. 51. - pp. 4782-4787.
- 厚生省 栄養表示基準における栄養成分等の分析方法等について [論文/レポート]. - 1999.
- 小原哲二郎, 鈴木隆雄, 岩尾裕之 改訂 食品分析ハンドブック [書籍]. : 建帛社, 1982.
- 菅原龍幸, 前川昭男 新 食品分析ハンドブック [書籍]. : 建帛社, 2000.
- 中野敦博 [ほか] アクリルアミド生成を抑制するポテトチップ製造法 [定期刊行物] // 北海道立食品加工研究センター報告. - 2007 年. - 第 7 巻. - ページ: 51-53.
- 道総研 加工用 (ポテトチップス用) 馬鈴しょの長期貯蔵における品質安定化技術 [オンライン] // 道総研 農業研究本部 中央農業試験場. - 2011a 年. - <http://www.agri.hro.or.jp/center/kenkyuseika/panf/23/21.pdf>.
- 道総研 加工用バレイショ周年供給のための長期貯蔵技術の開発 [オンライン] // 道総研 農業技術情報広場. - 2011b 年 1 月. - <http://www.agri.hro.or.jp/center/kenkyuseika/gaiyosho/23/f1/07.pdf>.
- 農林水産省 低コストで質の良い加工・業務用農産物の安定供給技術の開発 第 2 分冊 [書籍]. : 農林水産省, 2013. - 研究成果 485 巻.